

УДК 621.311

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/68/27>

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ГРОЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЗАВЕРШЕННЫХ ВОСХОДЯЩИХ РАЗРЯДОВ  
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

©*Темников А. Г.*, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия, [a\\_g\\_temnikov@mail.ru](mailto:a_g_temnikov@mail.ru)

©*Черненко Л. Л.*, канд. техн. наук, Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», г. Москва, Россия, [leonid@chernensky.ru](mailto:leonid@chernensky.ru)

©*Белова О. С.*, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия, [belovaos@mail.ru](mailto:belovaos@mail.ru)

©*Лысов Н. Ю.*, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия, [lysovny@mpei.ru](mailto:lysovny@mpei.ru)

©*Кившар Т. К.*, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия, [geratk@mail.ru](mailto:geratk@mail.ru)

**APPLICATION OF ARTIFICIAL THUNDERSTORM CELL FOR INVESTIGATION  
OF EFFECT OF INCOMPLETE UPWARD DISCHARGES ON FUNCTIONING  
OF CONCENTRATED MODEL ELEMENTS  
OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE MONITORING SYSTEMS**

©*Temnikov A.*, Ph.D., National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russia, [a\\_g\\_temnikov@mail.ru](mailto:a_g_temnikov@mail.ru)

©*Chernenskii L.*, Ph.D., National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russia, [leonid@chernensky.ru](mailto:leonid@chernensky.ru)

©*Belova O.*, National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russia, [belovaos@mail.ru](mailto:belovaos@mail.ru)

©*Lysov N.*, Ph.D., National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russia, [lysovny@mpei.ru](mailto:lysovny@mpei.ru)

©*Kivshar T.*, National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Moscow, Russia, [geratk@mail.ru](mailto:geratk@mail.ru)

*Аннотация.* Представлены результаты исследования с использованием искусственной грозовой ячейки возможного влияния незавершенных восходящих разрядов с сосредоточенных модельных элементов систем мониторинга воздушных линий электропередач (ВЛ) на их функционирование в электрическом поле грозового облака и/или молнии. Показано, что с самих модельных элементов системы мониторинга ВЛ (датчиков, приемно-передающих устройств сосредоточенного вида) формируются восходящие незавершенные разряды (стримеры и/или лидеры), которые могут воздействовать на функционирование таких устройств, в том числе за счет того, что в спектре их токов присутствуют частоты, близкие к рабочим частотам элементов системы мониторинга ВЛ. Установлено, что спектральные характеристики незавершенных стримерных и лидерных разрядов, формирующихся с модельных элементов датчиков и приемно-передающих устройств системы мониторинга под действием искусственной грозовой ячейки включают частотные диапазоны близкие к диапазонам частот работы аналого-цифровых преобразователей датчиков и устройств передачи данных по высокочастотному каналу

систем мониторинга сосредоточенного типа. Выявлена существенная роль стримерной короны на формирование сверхвысокочастотной составляющей импульса тока незавершенных разрядов. Полученные результаты могут помочь в обеспечении молниезащиты систем мониторинга в реальной грозовой обстановке.

*Abstract.* The results of a study using an artificial thunderstorm cell of the possible influence of incomplete ascending discharges from concentrated model elements of overhead line monitoring systems on their functioning in the electric field of a thundercloud and/or lightning are presented. It is shown that ascending incomplete discharges (streamers and/or leaders) are formed from the model elements of the overhead line monitoring system (sensors, receiving and transmitting devices of a concentrated type), which can affect the functioning of such devices, including due to the fact that frequencies close to the operating frequencies of the elements of the overhead line monitoring system are present in the spectrum of their currents. It is established that the spectral characteristics of incomplete streamer and leader discharges formed from model elements of sensors and of receiving and transmitting devices of the monitoring system under the influence of an artificial lightning cell include frequency ranges close to the frequency ranges of analog-to-digital converters of sensors and data transmission devices over a high-frequency channel of concentrated monitoring systems. The essential role of the streamer corona on the formation of the ultrahigh-frequency component of the current pulse of incomplete discharges is revealed. The obtained results can help to ensure lightning protection of monitoring systems in a real thunderstorm situation.

*Ключевые слова:* искусственная грозовая ячейка, стример, лидер, воздушная линия электропередач, система мониторинга, спектральные характеристики.

*Keywords:* artificial thunderstorm cell, streamer, leader, overhead transmission line, monitoring system, spectral characteristics.

### *Введение*

В настоящее время системы удаленного мониторинга различного назначения широко внедряются на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) и становятся важным элементом цифровой энергетики [1–4]. Использование элементов искусственного интеллекта в системах онлайн мониторинга состояния ВЛ (датчиков, аналого-цифровых преобразователей для обработки регистрируемых сигналов, антенных устройств – любых устройств, включающих в себя не только электромагнитную часть, но и цифровую технику преобразования, передачи/приема пакетов данных) показало проблему их функционирования в условиях воздействия молнии и атмосферного электричества [3–7]. Среди ряда различных вариантов такого воздействия остается не до конца исследованным влияние незавершенных разрядных явлений (вспышки стримерной короны, восходящий лидер), формирующихся на элементах систем мониторинга ВЛ под воздействием электрического поля грозовых облаков и молнии [8], на нормальное функционирование таких элементов систем мониторинга ВЛ. Использование искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности позволяет выполнить физическое моделирование и анализ ситуации (Рисунок 1), когда в электрическом поле грозового облака и/или молнии (стадии нисходящего лидера и главного разряда) с самих элементов системы мониторинга ВЛ (с элементов датчиков, приемно-передающих устройств сосредоточенного типа) формируются восходящие незавершенные разряды (стримеры и/или лидеры), которые могут воздействовать на функционирование таких устройств не только за счет протекающих через них токов и зарядов, но и в том случае, если в спектре их токов присутствуют частоты, близкие к рабочим частотам элементов системы мониторинга ВЛ.

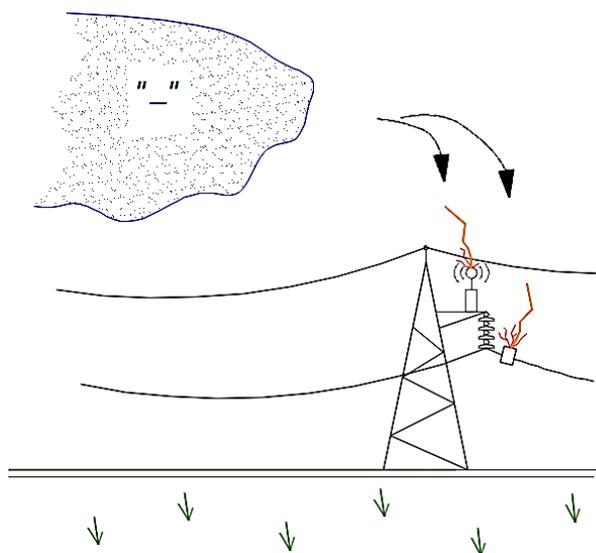


Рисунок 1. Случаи формирования стримерной короны/восходящего лидера с сосредоточенных элементов систем мониторинга ВЛ

### Экспериментальный комплекс и методы исследования

Моделирование физических процессов влияние незавершенных восходящих разрядов на сосредоточенные модельные элементы систем мониторинга ВЛ проводилось на экспериментально-измерительном комплексе «Гроза» [9]. Схема экспериментально-измерительного комплекса, использованная при проведении исследований, представлена на Рисунке 2.

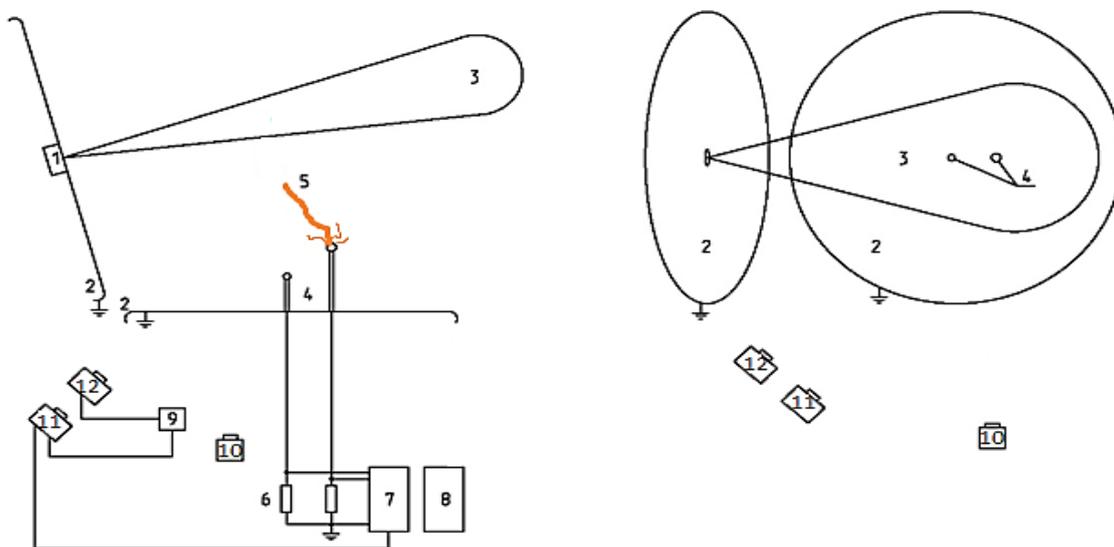


Рисунок 2. Схема экспериментального и измерительного комплекса «Гроза»: 1 – генератор заряженного аэрозоля, 2 – заземленные электростатические экраны, 3 – искусственная грозовая ячейка, 4 – сосредоточенные электроды, 5 – искровой разряд, 6 – малоиндуктивные шунты, 7,8 – цифровые запоминающие осциллографы Tektronix TDS 3054B и Tektronix DPO 7254, 9 – генератор запуска Г5-15, 10 – цифровой фотоаппарат Panasonic DMC-50, 11 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79, 12 – электронно-оптическая камера К-011

Потенциал искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности достигал 1,2 МВ. Элементы системы мониторинга и заземленные части ВЛ моделировались с помощью стержневых электродов с изолированными от них сферическими вершинами с различными

радиусами кривизны. Напряженность электрического поля, создаваемого искусственной грозовой ячейкой в местах расположения модельных электродов достигала 6 кВ/см. При возникновении восходящего разряда (импульсной стримерной короны, лидера) с вершины одного из электродов, регистрировались как сам импульс тока разряда, так и сигналы, наведенные на соседнем электроде (цифровой осциллограф DPO 7254, полоса пропускания 2500 МГц). В ряде случаев наблюдалось практически одновременное формирование восходящих незавершенных разрядов с вершин обоих электродов. Было выполнено и проанализировано более 300 экспериментальных подходов. Оптические характеристики разрядов, формирующихся между искусственной грозовой ячейкой и заземленными модельными электродами, регистрировались на основе статических фотографий, на основе пространственно-временной регистрации развития отдельной стадии разряда и предшествующих и последующих ей разрядных явлений программируемой электронно-оптической камерой.

Для моделирования ситуации формирования стримерной короны и/или восходящего лидерного разряда непосредственно с сосредоточенных элементов датчиков и приемопередающих устройств системы мониторинга в поле грозового облака следует выделить два варианта формирования разрядных процессов:

- на модельном электроде возникает вспышка стримерной короны, которая не приводит к возникновению восходящего лидера (стримерная корона, не перешедшая в дальнейшие стадии) (вариант В1),

- вспышка импульсной стримерной короны переходит в восходящий лидер, который, пройдя некоторое расстояние, останавливается в промежутке между заряженным облаком и землей и не достигает границ искусственной грозовой ячейки (стримерная корона – незавершенный восходящий лидер) (вариант В2).

При обработке экспериментальных осциллограмм тока разряда с заземленного модельного элемента определялись следующие основные характеристики импульса тока стримерной короны: амплитуда импульса тока разряда ( $|I_{max}|$ ), крутизна импульса тока, соответствующая уровням 0,3–0,9 от максимального тока ( $a_{0.3}$ ), суммарный протекший заряд ( $|Q_{сумм}|$ ) за время длительности импульса тока ( $\Delta T$ ). Для тока незавершенного лидера определены следующие параметры: амплитуда импульса тока разряда ( $|I_{max}|$ ), суммарный протекший заряд ( $|Q_{сумм}|$ ) за время длительности импульса тока ( $\Delta T$ ). Характерные осциллограммы импульсов тока вспышки стримерной короны, не переходящей и переходящей в незавершенный лидерный разряд, приведены на Рисунке 3.

Так как условия возникновения вспышки стримерной короны и вероятность ее перехода в лидер существенно зависят от характера распределения электрического поля вблизи вершины заземленного электрода [10], то при проведении экспериментальных исследований радиусы вершин модельных сосредоточенных объектов варьировались от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, чтобы моделировать ситуацию формирования при воздействии атмосферного электричества и молнии разрядных явлений с элементов систем мониторинга, имеющих существенно отличные коэффициенты усиления электрического поля. При статистической обработке данных различие модельных объектов учтено с помощью разбиения на группы по коэффициентам усиления электрического поля: группа 1 —  $K_{ус} < 12$ , группа 2 —  $12 < K_{ус} < 27$ , группа 3 —  $K_{ус} > 27$ .

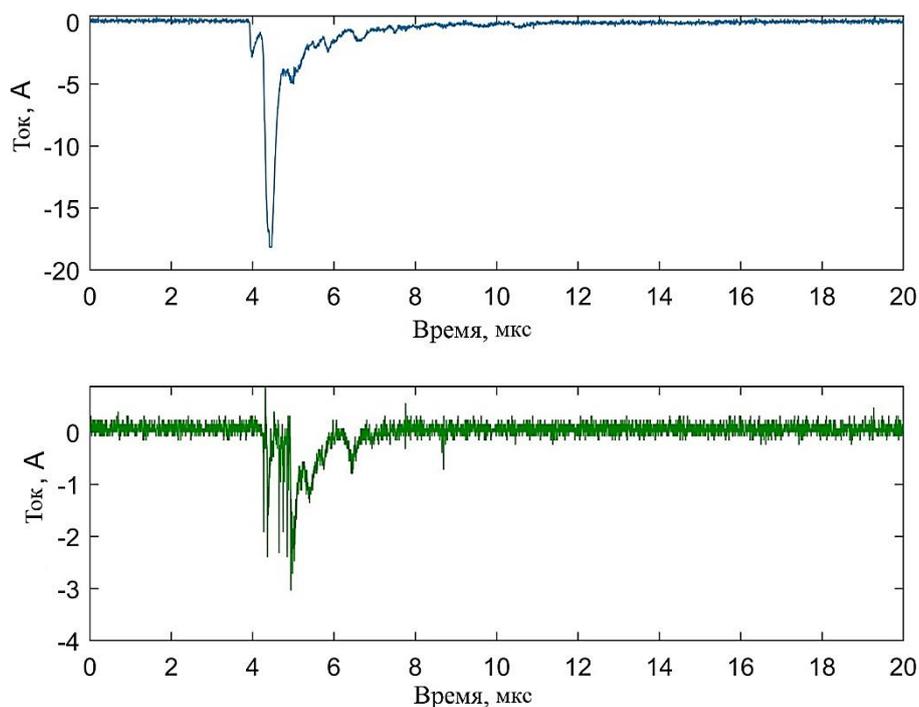


Рисунок 3. Характерные осциллограммы импульсов тока стримерной короны с сосредоточенного модельного элемента, переходящей (верхняя) и не переходящей (нижняя) в незавершенный лидер

На основе вейвлетного анализа с использованием базисного вейвлета «Мексиканская шляпа» [11, 12] определялись спектральные характеристики импульсов тока тока незавершенных восходящих разрядов, инициируемых между искусственной грозовой ячейкой и заземленными модельными элементами системы мониторинга воздушных линий электропередачи. При обработке и анализе полученных спектрограмм (вейвлетограмм) определялись максимальная частота  $f_{\max}$  в вейвлетном спектре, частота  $f(C_{\max})$ , соответствующая максимальной интенсивности  $C_{\max}$  в вейвлетном спектре. Характерные вейвлетограммы импульсов тока вспышки стримерной короны, не переходящей и переходящей в незавершенный лидерный разряд, приведены на Рисунке 4.

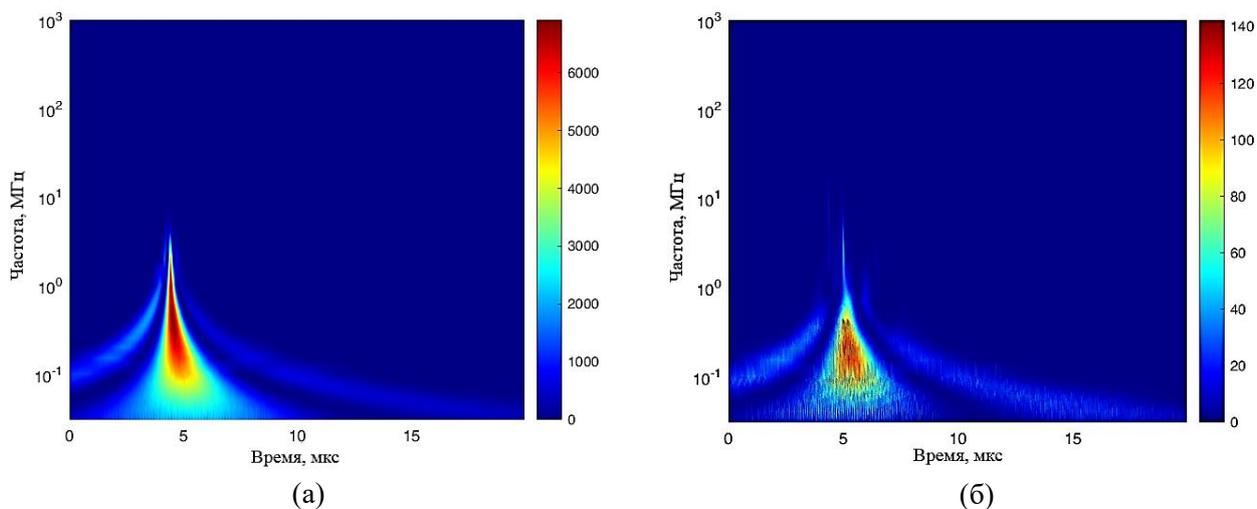


Рисунок 4. Характерные вейвлетные спектры импульса тока стримерной короны с сосредоточенного модельного элемента без перехода (а) и с переходом в восходящий незавершенный лидер (б)

### Результаты и обсуждение

На основании обработки и обобщения результатов экспериментов, при которых с модельных сосредоточенных элементов формировалась только вспышка стримерной короны (вариант В1), определены характеристики импульса тока в зависимости от характера распределения электрического поля (группы коэффициента усиления) вблизи таких модельных объектов (Таблица 1).

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ИМПУЛЬСА ТОКА СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ  
 НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ (вариант В1)

Группа Кус	$\Delta T, \text{ мкс}$	$a0.3, \text{ А/нс}$	$ I_{\text{max}} , \text{ А}$	$ Q_{\text{сумм}} , \text{ мкКл}$
Группа 1	3,0	0,06	5,4	3,2
Группа 2	4,2	0,03	2,7	3,0
Группа 3	3,0	0,05	2,2	1,7

На модельных датчиках с относительно небольшими коэффициентами усиления электрического поля (группа 1) наблюдается наиболее мощные вспышки импульсной стримерной короны со средними амплитудами тока 5,4 А и перенесенными зарядами 3,2 мкКл. Для модельных датчиков с относительно большими коэффициентами усиления электрического поля (группа 3) средние значения этих параметров в несколько раз меньше.

Анализ спектральных характеристик импульса тока вспышки стримерной короны с модельных сосредоточенных элементов системы мониторинга, которая не переходила в восходящий лидер, показал существенное влияние характеристики электрического поля (группы коэффициента усиления) вблизи таких объектов на характерные частотные диапазоны (Таблица 2).

Таблица 2

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ИМПУЛЬСА ТОКА  
 СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ (Вариант В1)

Группа Кус	$f_{\text{max}}, \text{ МГц}$	$f(C_{\text{max}}), \text{ МГц}$	$C_{\text{max}}, \times 10^3 \text{ А}^2$
Группа 1	9,9	0,9	1,4
Группа 2	13,2	1,1	0,6
Группа 3	83,5	5,8	0,3

Если для модельных датчиков с относительно небольшими коэффициентами усиления электрического поля (группа 1) и со «средними» коэффициентами усиления электрического поля (группа 2) максимальные частоты в спектре тока импульсной стримерной короны не превышали нескольких десятков МГц, то для модельных датчиков с относительно большими коэффициентами усиления электрического поля (группа 3) в вейвлетном спектре импульса тока присутствовали частоты в сотни МГц (до 1 ГГц).

Аналогичная тенденция наблюдалась для вспышек импульсной стримерной короны и для частот  $f(C_{\text{max}})$ , соответствующих максимальной интенсивности  $C_{\text{max}}$  в вейвлетном спектре, где для экспериментов с заземленными модельными элементами (датчиками), характеризовавшимися относительно большими коэффициентами усиления электрического поля (группа 3), присутствовали частоты в диапазонах 70-80 МГц и 90-100 МГц.

Обработка результатов экспериментов, при которых с модельных сосредоточенных элементов формировалась вспышка стримерной короны, переходящая в незавершенный

восходящий лидер (вариант В2), показала следующие характеристики тока на этих элементах, в зависимости характеристики электрического поля (группы коэффициента усиления) на таких объектах (Таблица 3, 4).

Таблица 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ИМПУЛЬСА ТОКА СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ  
 НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ (вариант В2)

Группа Кус	$\Delta T$ , мкс	$a0.3$ , А/нс	$ I_{max} $ , А	$ Q_{сумм} $ , мкКл
Группа 1	2,3	0,12	11,7	5,4
Группа 2	6,3	0,06	6,8	7,2
Группа 3	2,6	0,04	4,5	2,1

Таблица 4

ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ТОКА НЕЗАВЕРШЕННОГО ВОСХОДЯЩЕГО  
 ЛИДЕРА НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ (вариант В2)

Группа Кус	$\Delta T$ , мкс	$ I_{max} $ , А	$ Q_{сумм} $ , мкКл
Группа 1	5,8	2,3	3,0
Группа 2	13,4	1,1	4,2
Группа 3	12,4	1,1	2,8

В этом случае для всех модельных электродов всех трех групп коэффициентов усиления электрического поля наблюдаются, в среднем, более высокие значения (примерно в полтора-два раза) амплитуды импульса тока и перенесенного заряда вспышки стримерной короны по сравнению со случаем, когда стримерная корона не переходила в восходящие лидер. Для незавершенного лидера наибольшие средние значения тока (2,3 А) наблюдались на модельных датчиках с относительно небольшими коэффициентами усиления электрического поля (группа 1), а перенесенного заряда (4,2 мкКл) на модельных датчиках со «средним» коэффициентом усиления электрического поля (группа 2).

Анализ спектральных характеристик тока вспышки стримерной короны с модельных сосредоточенных элементов, которая переходила в незавершенный восходящий лидер, показал относительно слабое влияние группы коэффициента усиления поля вблизи таких объектов на характерные частоты (Таблица 5).

Таблица 5

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ИМПУЛЬСА ТОКА  
 СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ,  
 ПЕРЕХОДЯЩЕЙ В НЕЗАВЕРШЕННЫЙ ВОСХОДЯЩИЙ ЛИДЕР (вариант В2)

Группа Кус	$f_{max}$ , МГц	$f(C_{max})$ , МГц	$C_{max}$ , $\times 10^3$ А <sup>2</sup>
Группа 1	6,6	0,6	3,2
Группа 2	7,5	0,5	1,3
Группа 3	7,4	0,5	0,6

При всех группах коэффициентов усиления электрического поля характерные максимальные частоты в вейвлетном спектре импульса тока стримерной короны редко превышали 20 МГц. Аналогичная тенденция наблюдалась и для частот  $f(C_{max})$ , соответствующих максимальной интенсивности  $C_{max}$  в вейвлетном спектре, которые редко превышали значения в 1 МГц.

Анализ вейвлетного спектра тока незавершенного восходящего лидера, развивающегося с сосредоточенного модельного объекта в электрическом поле искусственной грозовой ячейки, показал, что в нем максимальные частоты не превышают 1 МГц, а частоты, соответствующие максимальной интенсивности в спектре, находятся на уровне сотни кГц (Таблица 6).

Таблица 6.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ) ЛИДЕРНОГО ТОКА ДЛЯ СЛУЧАЯ ИМПУЛЬСНОЙ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, ПЕРЕХОДЯЩЕЙ В НЕЗАВЕРШЕННЫЙ ВОСХОДЯЩИЙ ЛИДЕР (вариант В2)

Группа Кус	$f_{max}$ , МГц	$f(C_{max})$ , МГц	$C_{max}$ , $\times 10^3 A^2$
Группа 1	0,5	0,1	2,6
Группа 2	0,2	0,1	1,2
Группа 3	0,9	0,1	0,5

Таким образом, спектр импульса тока стримерной вспышки с модельного сосредоточенного элемента зависит от величины напряженности электрического поля и характера изменения этого поля в месте, где происходит формирование лавинно-стримерной системы [13]. Для модельных сосредоточенных элементов с большими коэффициентами усиления электрического поля (группа 3) в вейвлетном спектре импульса тока стримерной вспышки максимальные частоты достигают десятков-сотен МГц. Для модельных сосредоточенных элементов с меньшими коэффициентами усиления электрического поля, в пространстве вблизи которых изменение напряженности поля происходит менее резко, в спектре импульса тока импульсной стримерной короны характерные частотные диапазоны будут несколько ниже: 1-40 МГц.

Импульсная стримерная корона, формирующаяся на сосредоточенных модельных элементах (датчиках и антеннах приемно-передающих устройств) системы мониторинга ВЛ, может создавать риски для их функционирования. В частности, целый ряд датчиков сосредоточенного типа, устанавливаемых на ВЛ, может срабатывать на быстрое нарастание тока в импульсах тока, которые могут быть при формировании с датчика мощной вспышки стримерной короны [14, 15]. Для модельных элементов (датчиков), относящихся к третьей группе по величине коэффициента усиления электрического поля, могут быть сбои при возникновении с них вспышки стримерной короны, если для измерения сигналов, выработанных датчиками, используются однокристалльные микроконтроллеры с тактовой частотой в несколько сотен МГц [2, 16, 17]. Найденные спектры импульсов тока стримерной вспышки с сосредоточенных элементов (датчиков и антенн приемно-передающих устройств) систем мониторинга могут вызывать ложные срабатывания и сбои датчиков, если в их состав входят аналого-цифровые преобразователи с рабочими частотами от десятков-сотен Гц в медленных высокоточных АЦП до нескольких сотен МГц в скоростных высокопроизводительных АЦП [1, 7, 18, 19], или приводить к сбою в работе приемно-передающих устройств, искажению или потере передаваемой информации [3, 7, 20].

#### Заключение

Исследования, с использованием искусственной грозовой ячейки, возможного влияния незавершенных восходящих разрядов с сосредоточенных модельных элементов систем мониторинга ВЛ на их функционирование в электрическом поле грозового облака и/или

молнии показали, что с самих модельных элементов (датчиков, приемно-передающих устройств сосредоточенного вида) системы мониторинга ВЛ формируются восходящие незавершенные стримерные и лидерные разряды, которые могут воздействовать на функционирование таких устройств за счет того, что в спектре их токов присутствуют частоты, близкие к рабочим частотам элементов системы мониторинга ВЛ. Установлено, что параметры импульса тока восходящих незавершенных разрядов и его спектральные характеристики зависят от характера распределения электрического поля вблизи заземленного модельного сосредоточенного элемента (коэффициента усиления электрического поля). Выявлено, что наибольшие значения амплитуды и крутизны импульса тока наблюдались на модельных сосредоточенных элементах с относительно небольшими коэффициентами усиления электрического поля (группа 1) при формировании вспышки стримерной короны, переходящей в восходящий лидер. На основе вейвлетного анализа импульсов тока незавершенных восходящих разрядов найдено, что стримерные вспышки характеризуются на порядок большими частотами в токе, чем лидерная стадия (максимальные частоты, в среднем, 6-20 МГц против 0.5-0.7 МГц). Особенно это проявляется для модельных сосредоточенных элементов с большими коэффициентами усиления электрического поля (группа 3) — в вейвлетном спектре импульса тока стримерной вспышки максимальные частоты могут достигать единиц ГГц. Установлено, что в спектре импульса тока стримерных вспышек незавершенных восходящих разрядов, формирующихся с модельных сосредоточенных элементов датчиков и приемно-передающих устройств системы мониторинга ВЛ присутствуют диапазоны в десятки-сотни МГц (до 1 ГГц), которые близки к диапазонам частот работы аналого-цифровых преобразователей датчиков и/или устройств передачи данных по высокочастотному каналу систем мониторинга, что будет приводить к сбоям в их работе, ложным срабатываниям, некорректной передаче информации и создавать в результате существенные риски для функционирования онлайн систем мониторинга ВЛ в грозных условиях.

*Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019)*

#### *Список литературы:*

1. Борисов Р. К., Жуликов С. С., Глазунов П. С., Кошелев М. А., Максимов Б. К., Мирзабекян Г. З., Турчанинова Ю. С. Аппаратно-программный комплекс удаленного мониторинга линейных ОПН под рабочим напряжением // *Электротехника*. 2019. №2. С. 42-47.
2. Борисов Р. К., Кочуров О. М., Коломиец Е. В., Чернокоз А. Я. Система мониторинга электромагнитной обстановки на подстанциях // *Энергоэксперт*. 2019. №1. С. 38-40.
3. Самарин А., Масалов В. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // *Control Engineering Россия*. 2013. Т. 45. №3. С. 88-94.
4. Hu Y., Liu K. *Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing*. Academic Press, 2017.
5. Hoole P. R. P., Sharip M. R. M., Fisher J., Pirapaharan K., Julai N., Rufus S. A., Hoole S. R. H. Lightning Protection of Aircraft, Power Systems and Houses Containing IT Network Electronics // *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*. 2017. V. 9. №3-10. P. 1-7.

6. Deng C.-J. Challenges and Prospects of Power Transmission Line Intelligent Monitoring Technology // American Research Journal of Computer Science and Information Technology. 2019. V. 4. №2. P. 1-11.
7. Ahmad M. R., Esa M. R. M., Cooray V., Dutkiewicz E. Interference from cloud-to-ground and cloud flashes in wireless communication system // Electric Power Systems Research. 2014. V. 113. P. 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.022>
8. Cooray V. Electromagnetic Fields of Lightning Flashes // An Introduction to Lightning. Springer, Dordrecht, 2015. P. 135-165. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7_9)
9. Темников А. Г., Черненский Л. Л., Орлов А. В., Лысов Н. Ю., Журавкова Д. С., Белова О. С., Герастенок Т. К. Применение искусственных грозовых ячеек для исследования проблем инициирования молнии между грозовым облаком и землей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. №2. С. 48-61.
10. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
11. Esa M. R. M., Ahmad M. R., Cooray V. Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden // Atmospheric research. 2014. V. 138. P. 253-267.
12. Темников А. Г., Орлов А. В., Черненский Л. Л., Белова О. С., Герастенок Т. К., Зимин А. С. Исследование систем определения места удара и параметров разряда молнии с использованием искусственного грозового облака // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2015. №6. С. 80-86.
13. Cooray V., Cooray G. Electromagnetic radiation field of an electron avalanche // Atmospheric research. 2012. V. 117. P. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.004>
14. Брагин А. А. Система определения места повреждения воздушных линий электропередачи 6-10 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №5. P. 82-88.
15. Мельников С. А., Шакенов Е. Е., Плотников Д. И., Паламарчук Д. В., Мельников Н. А. Мониторинг линий электропередачи в задачах управления пропускной способностью в режиме реального времени // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. №1-1 (67). С. 115-119. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.67.089>
16. Borisov R. K., Zhulikov S. S., Koshelev M. A., Maksimov B. K., Mirzabekyan G. Z., Turchaninova Y. S., Khrenov S. I. A Computer-Aided Design System for Protecting Substations and Overhead Power Lines from Lightning // Russian Electrical Engineering. 2019. V. 90. №1. P. 86-91. <https://doi.org/10.3103/S1068371219010036>
17. Liu Y., Wu T., Yin H. Transmission Line on-line Monitoring System Based on Ethernet and McWiLL // International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS 2015). Atlantis Press, 2015. P. 680-683. <https://dx.doi.org/10.2991/lemcs-15.2015.133>
18. Умняшкин С. В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012.
19. Douglass D., Chisholm W., Davidson G., Grant I., Lindsey K., Lancaster M., Waltz P. Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. V. 31. №3. P. 921-927. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2383915>
20. Фомин А. И., Ялин А. К. Анализ помехоустойчивости радиосистемы передачи информации мониторинга с квадратурным компенсатором узкополосных помех // Электросвязь. 2016. №5. С. 68-73.

References:

1. Borisov, R. K., Zhulikov, S. S., Glazunov, P. S., Koshelev, M. A., Maksimov, B. K., Mirzabekjan, G. Z., & Turchaninova, Ju. S. (2019). Apparato-programmnyj kompleks udalennogo monitoringa linejnyh OPN pod rabochim naprjazheniem. *Jelektrotehnika*, (2), 42-47. (in Russian)
2. Borisov, R. K., Kochurov, O. M., Kolomic, E. V., & Chernokoz, A. Ja. (2019). Sistema monitoringa jelektromagnitnoj obstanovki na podstancijah. *Jenergojeksper*, (1), 38-40. (in Russian)
3. Samarin, A., & Masalov, V. (2013). Sovremennye tehnologii monitoringa vozdušnyh jelektrosetej LJeP. *Control Engineering Rossija*, 45(3), 88-94. (in Russian)
4. Hu, Y., & Liu, K. (2017). *Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing*. Academic Press.
5. Hoole, P. R. P., Sharip, M. R. M., Fisher, J., Pirapaharan, K., Julai, N., Rufus, S. A., ... & Hoole, S. R. H. (2017). Lightning Protection of Aircraft, Power Systems and Houses Containing IT Network Electronics. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 9(3-10), 1-7.
6. C.-J. Deng. Challenges and Prospects of Power Transmission Line Intelligent Monitoring Technology. *American Research Journal of Computer Science and Information Technology*, vol 4, no. 2, 2019, pp. 1-11.
7. Ahmad, M. R., Esa, M. R. M., Cooray, V., & Dutkiewicz, E. (2014). Interference from cloud-to-ground and cloud flashes in wireless communication system. *Electric Power Systems Research*, 113, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.022>
8. Cooray, V. (2015). Electromagnetic Fields of Lightning Flashes. In *An Introduction to Lightning* (pp. 135-165). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7_9)
9. Temnikov, A. G., Chernenskij, L. L., Orlov, A. V., Lysov, N. Ju., Zhuravkova, D. S., Belova, O. S., & Gerastenok, T. K. (2017). Primenenie iskusstvennyh grozovyh jacheek dlja issledovaniya problem iniciirovaniya molnii mezhdru grozovym oblakom i zemlej. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Jenergetika*, (2), 48-61. (in Russian).
10. Bazelyan E. M., Raiser Yu. P. Physics of lightning and lightning protection. Moscow: FIZMATLIT, 2001 (in Russian).
11. Esa, M. R. M., Ahmad, M. R., & Cooray, V. (2014). Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden. *Atmospheric research*, 138, 253-267.
12. Temnikov, A. G., Orlov, A. V., Chernenskij, L. L., Belova, O. S., Gerastenok, T. K., & Zimin, A. S. (2015). Issledovanie sistem opredelenija mesta udara i parametrov razrjada molnii s ispol'zovaniem iskusstvennogo grozovogo oblaka. *Vestnik Moskovskogo jenergetičeskogo instituta. Vestnik MJeI*, (6), 80-86. (in Russian).
13. Cooray, V., & Cooray, G. (2012). Electromagnetic radiation field of an electron avalanche. *Atmospheric research*, 117, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.004>
14. Bragin, A. A. (2019). Sistema opredelenija mesta povrezhdenija vozdušnyh linij jelektroperedachi 6-10 kV. *Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie*, (5), 82-88. (in Russian)
15. Melnikov, S. A., Shakenov, E. E., Plotnikov, D. I., Palamarchuk, D. V., & Mel'nikov, N. A. (2018). Monitoring linij jelektroperedachi v zadachah upravlenija propusknoj sposobnost'ju v rezhime real'nogo vremeni. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, (1-1 (67)). 115-119 (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.67.089>
16. Borisov, R. K., Zhulikov, S. S., Koshelev, M. A., Maksimov, B. K., Mirzabekyan, G. Z., Turchaninova, Y. S., & Khrenov, S. I. (2019). A Computer-Aided Design System for Protecting Substations and Overhead Power Lines from Lightning. *Russian Electrical Engineering*, 90(1), 86-91. <https://doi.org/10.3103/S1068371219010036>

17. Liu, Y., Wu, T., & Yin, H. (2015, July). Transmission Line on-line Monitoring System Based on Ethernet and McWiLL. In *International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS 2015)* (pp. 680-683). Atlantis Press. <https://dx.doi.org/10.2991/lemcs-15.2015.133>

18. Umnjashkin, S. V. (2012). Teoreticheskie osnovy cifrovoj obrabotki i predstavlenija signalov. Moscow. (in Russian).

19. Douglass, D., Chisholm, W., Davidson, G., Grant, I., Lindsey, K., Lancaster, M., ... & Waltz, P. (2014). Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(3), 921-927. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2383915>

20. Fomin, A. I., & Jalin, A. K. (2016). Analiz pomehoustojchivosti radiosistemy peredachi informacii monitoringa s kvadraturnym kompensatorom uzkopolosnyh pomeh. *Jelektrosvjaz'*, (5), 68-73. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 15.07.2021 г.

Принята к публикации  
19.07.2021 г.

---

*Ссылка для цитирования:*

Темников А. Г., Черненский Л. Л., Белова О. С., Лысов Н. Ю., Кившар Т. К. Использование искусственной грозовой ячейки для исследования влияния незавершенных восходящих разрядов на функционирование сосредоточенных модельных элементов систем мониторинга воздушных линий электропередачи // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. №8. С. 241-252. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/69/27>

*Cite as (APA):*

Temnikov, A., Chernenskii, L., Belova, O., Lysov, N., & Kivshar, T. (2021). Application of Artificial Thunderstorm Cell for Investigation of Effect of Incomplete Upward Discharges on Functioning of Concentrated Model Elements of Overhead Transmission Line Monitoring Systems. *Bulletin of Science and Practice*, 7(8), 241-252. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/69/27>