

УДК 621.301

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-46-52

Особенности расчета поражения молнией элементов воздушных линий электропередачи

И.Е. Калугина, А.Г. Темников, С.В. Гундарева, Л.Л. Черненский

Представлены основные положения и особенности методики расчета поражения элементов линий электропередачи (ЛЭП) молнией на основе вероятностного подхода. Методика учитывает современные представления о процессе поражения молнией наземных объектов. Предложена модель развития нисходящего лидера молнии, максимально приближенная к реальному процессу формирования отрицательного ступенчатого лидера. Разработана схема процесса ориентации лидера на наземный объект. Решение задачи в рамках трехмерного моделирования позволяет анализировать возможность возникновения встречного лидера не только с фазных проводов и молниезащитных тросов, но и с опор линии. Изложен вероятностный подход для условий перехода вспышки стримерной короны в восходящий лидер, основанный на экспериментальных и теоретических исследованиях. Рассмотрена возможность учета природно-климатических условий и топографии в районах прохождения трассы линии. Методика и разработанный на ее основе программный комплекс позволят наиболее обоснованно определять места ударов молнии в элементы воздушных линий и их вероятности, что поможет создать надежную защиту воздушной линии (ВЛ).

Ключевые слова: число ударов молнии, воздушная линия, нисходящий отрицательный лидер, встречный восходящий лидер с объекта, длина ступени лидера, вспышка стримерной короны, вероятность поражения, вероятностный подход.

Для цитирования: Калугина И.Е., Темников А.Г., Гундарева С.В., Черненский Л.Л. Особенности расчета поражения молнией элементов воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 46—52. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-46-52.

Some Features of Calculating the Lightning-Induced Damages to Overhead Power Line Elements

I.E. Kalugina, A.G. Temnikov, S.V. Gundareva, L.L. Chernensky

The article presents the main principles and specific features of a procedure for calculating the lightning-induced damage inflicted to power transmission line elements based on a probabilistic approach. The procedure takes into account the modern concepts on how lightning strikes at ground objects. A model simulating the development of a downward lightning leader in a manner maximally close to the real negative stepped leader development process is proposed. A scheme illustrating how a leader is targeting at a ground object has been developed. By solving the problem within the framework of 3D modeling, the possibility of a connecting leader to develop not only from the phase wires and overhead ground wires, but also from the line supports can be analyzed. Based on experimental and theoretical studies, a probabilistic approach for conditions under which the streamer corona flash transforms into an upward leader is proposed. The possibility of taking into account the natural and climatic conditions, and topography in the line route regions is considered. The elaborated procedure and the software package developed on its basis allow the places of lightning strikes at overhead power line elements and their probabilities to be predicted in the most grounded manner, which will make it possible to set up reliable overhead power line protection.

Key words: number of lightning strikes, overhead power line, downward negative leader, upward connecting leader from an object, leader step length, streamer corona flash, striking probability, probabilistic approach.

For citation: Kalugina I.E., Temnikov A.G., Gundareva S.V., Chernensky L.L. Some Features of Calculating the Lightning-Induced Damages to Overhead Power Line Elements. Bulletin of MPEI. 2020;6:46—52. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-46-52.

Введение

Проблема молниезащиты, несмотря на длительную историю ее развития, не теряет своей актуальности. Современные высокие требования к качеству производства и электроснабжения потребителей различных категорий поднимают необходимый уровень защиты объектов электроэнергетики, в особенности, самого протяженного и уязвимого к грозовым разрядам элемента энергетической системы — линий электропередачи (ЛЭП).

Действующие нормативные документы по молниезащите ЛЭП и подстанций базируются на традици-

онных подходах (зонах защиты стержневых и тросовых молниеотводов, полумпирических зависимостях, электрогеометрических построениях), основные положения многих из них не обновлялись несколько десятков лет. Они часто не позволяют объективно оценить надежность защиты объекта и получить достоверную информацию о влиянии различных факторов на его молниезащищенность.

Тем временем, данные эксплуатации ЛЭП и результаты экспериментальных и наблюдательных исследований по поражениям молниями наземных объектов показывают, что именно такие нюансы, как геометри-

ческие параметры элементов ЛЭП, наличие рабочего напряжения на них, топографические условия вдоль трассы прохождения линии электропередачи, специфическая грозовая активность на разных участках трассы ВЛ могут быть определяющими в оценках молниепоражаемости воздушных линий электропередачи. Следует учитывать дополнительное защитное действие естественных молниеотводов, в роли которых выступают сооружения произвольной высоты и конфигурации, рельеф окружающей местности и участки городской застройки.

В последние десятилетия получены новые данные по физическим механизмам формирования молнии и поражения ею наземных объектов. Они требуют своего учета при корректировке существующих и разработке новых современных методов расчета молниепоражаемости воздушных линий электропередачи.

В последнее время наиболее перспективным направлением в разработке методов оценки молниепоражаемости наземных объектов считается использование физико-математических и численных моделей, предусматривающих детальное описание процесса поражения, исходя из реальной физической картины этого явления [1—5].

Представлены основные положения и особенности разрабатываемой методики расчета поражения элементов ЛЭП молнией на основе вероятностного подхода с учетом современных представлений о процессе поражения молнией линий электропередачи.

Основные положения методики

Успех разрабатываемой методики, в первую очередь, зависит от адекватности расчетной схемы физическим процессам при развитии нисходящего лидера молнии к земле и поражения молнией объекта. Физические представления о процессах развития молнии и поражения объекта базируются на результатах полевых и фотографических измерений и данных, полученных при изучении лабораторных искровых разрядов в длинных воздушных промежутках, предполагая их идентичность молниевым.

Ключевая стадия, связывающая накопленные в грозовом облаке заряды и какой-либо объект на поверхности земли, и во многом определяющая место поражения — нисходящий лидер молнии. Без использования адекватного реальности представления о развитии лидера молнии невозможно решение вопросов определения зон защиты молниеотводов и вероятности поражения защищаемых ими объектов.

На территории России почти в 90% случаев разряды молнии в системе «облако — земля» развиваются из отрицательно заряженных областей грозового облака и переносят на землю отрицательный заряд. В настоящее время есть несколько отличающихся моделей как прорастания отрицательного лидера, так и процесса ориентации молнии на объект, реализованных в мето-

диках оценки поражаемости объектов. Существует несколько положений, касающихся лидерного процесса, на которых основаны все современные физические модели и методики расчета поражаемости наземных объектов молнией.

Процесс развития нисходящего лидера молнии условно делят на два этапа: до ориентации лидера на объект и, собственно, сам процесс ориентации, когда лидер получает преимущественное направление к объекту и поражает его.

На основании результатов полевых и фотографических измерений установлено, что на первом этапе отрицательный лидер молнии движется к земле ступенями. Длина ступени варьируется от 5 до 200 м при средней величине 50 м. Траектория нисходящего лидера молнии представляет собой искривленную и разветвленную структуру. Направление движения лидера имеет большую вертикальную составляющую. Возможные отклонения траектории случайны и равновероятны. Заряд распределен по каналу неравномерно.

Таким образом, модель отрицательного лидера молнии должна быть максимально приближена к реальному процессу формирования отрицательного ступенчатого лидера и учитывать следующие моменты:

- трехмерный характер формирования разрядов в промежутке между грозовым облаком и наземным объектом;
- неравномерное распределение заряда вдоль канала лидера с учетом удлинения последнего по мере его продвижения к земле;
- ступенчатый характер распространения отрицательного нисходящего лидера молнии;
- многообразие возможных траекторий развития нисходящего лидера по направлению к земле (возможность приближения к земле под различными углами с учетом возможных разветвлений);
- вероятностный (случайный) характер всех параметров нисходящего лидера, их взаимную связь и связь с характеристиками последующего главного разряда молнии.

В предлагаемой методике нисходящий лидер молнии рассмотрен как цилиндрический заряженный канал со сферическим нижним окончанием, начинающий свое движение (развитие) к земле с высоты нижней границы основного отрицательного заряда грозового облака (рис. 1). Для умеренных широт эта высота соответствует диапазону значений от 3 до 5 км, поэтому в методике принята равной среднему значению $H_{обл} = 4$ км над землей. Наличие квазиоднородного электрического поля, создаваемого грозовым облаком, учтено и смоделировано постоянной вертикальной составляющей напряженности электрического поля $E_{обл}$ во всем воздушном промежутке от высоты облака до уровня земли. Согласно полевым измерениям электрическое поле на уровне земли под активным грозовым облаком может достигать от 1 до 10 кВ/м для равнинной

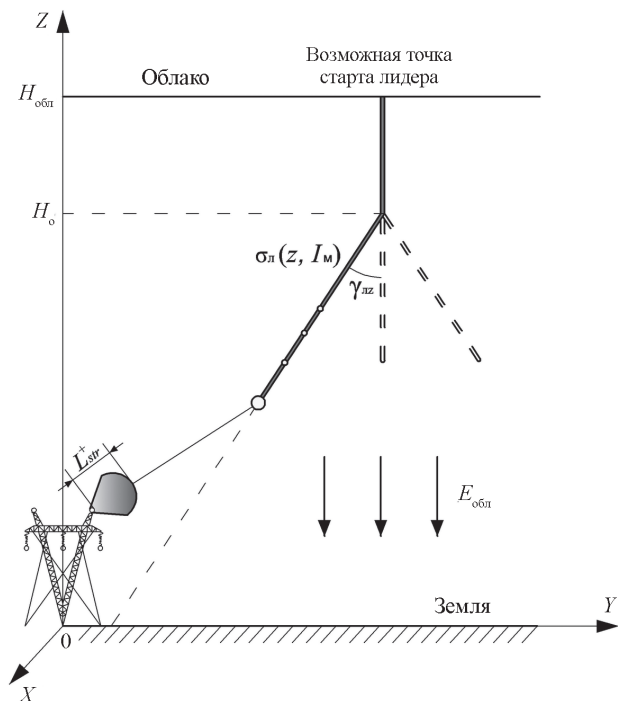


Рис. 1. Модель отрицательного нисходящего лидера молнии

местности [6]. Заряд лидера молнии расположен на центральной оси канала и распределен неравномерно, с резким увеличением к головке. При моделировании распределения заряда могут быть использованы и проанализированы несколько известных распределений [1, 2].

Аналогично работе [7] сделано предположение, что плазменное ядро-«пилот» (будущее положение головки лидера молнии после прорастания канала на одну ступень) образуется на границе стримерной зоны головки лидера молнии. Таким образом, длина ступени L_{st} отрицательного нисходящего лидера приравнивается к длине отрицательной стримерной зоны L_{str} его головки. Тогда длина стримерной зоны определяется как:

$$\frac{\int_{z_0}^{z_0+L_{str}} E(x) dx}{L_{str}} = E_{str}^- \delta(z), \tag{1}$$

где E_{str}^- — средняя напряженность электрического поля внутри образовавшейся отрицательной стримерной зоны, принята равной 10 кВ/см; $\delta(z)$ — относительная плотность воздуха, зависящая от высоты z (км) над землей:

$$\delta(z) = 1 - 0,07z.$$

Данные наблюдений за молниями показали, что траектория нисходящего лидера молнии представляет собой искривленную и разветвленную структуру, а возможные отклонения траектории носят случайный характер. Траектория лидера молнии должна влиять на величину поля около объекта и, следовательно, на возникновение встречного лидера с него. Но в то же

время можно ожидать, что верхние участки канала лидера вносят значительно меньший вклад в поле около объекта, чем его нижние участки. Кроме того, искривленность и разветвленность нижних участков канала молнии значительно меньше, чем верхних, поэтому, предположительно, ее влияние на процесс ориентации незначительно.

В такой ситуации в предлагаемой методике первоначальное движение лидера молнии от выбранной ячейки на нижней границе основного отрицательного заряда облака к земле считается вертикальным к поверхности земли, пока головка лидера не достигнет некоторой высоты H_0 , равной приблизительно 0,5...1,5 км над землей в зависимости от величины тока молнии (заряда нисходящего лидера). Затем возможные искривленность траектории отрицательного лидера и подход молнии с различных сторон к объекту учитывается вариацией различных углов наклона его канала к земной поверхности $\gamma_{лз}$.

Углы отклонения нисходящего лидера молнии от вертикали при его приближении к поверхности земли показывают случайный характер и могут быть описаны функцией плотности вероятности [8]:

$$f(\gamma_{лз}) = \begin{cases} 0; & \gamma_{лз} < -\pi/2; \\ k_m \cos^m \gamma_{лз}; & -\pi/2 < \gamma_{лз} < \pi/2; \\ 0; & \gamma_{лз} > \pi/2. \end{cases}$$

Суммарная вероятность появления лидера для всего диапазона углов нормирована на единицу. Наиболее адекватным считается использование в данной функции $m = 2$ и $k_m = 2/\pi$.

При моделировании отрицательного нисходящего лидера молнии в методике рассмотрена возможность его подхода к рассматриваемой ЛЭП с разных сторон. В реальности вероятность подхода грозового облака к объекту с разных направлений неодинакова и зависит от розы ветров в районе расположения объекта. При наличии необходимой информации это обстоятельство можно учесть путем введения весовых коэффициентов для рассматриваемых направлений.

Известно, что амплитуда тока обратного разряда молнии — случайный параметр. Для определения плотности вероятности появления отрицательной молнии с заданной амплитудой тока обратного разряда используется выражение, предлагаемое в последних на сегодняшний день рекомендациях комитета CIGRE [9].

Когда головка лидера достигает некоторой высоты, у заземленного объекта формируется электрическое поле, достаточное для развития встречного лидера. Это событие связано с началом процесса ориентации молнии.

Моделирование процесса ориентации лидера на объект выполнено следующим образом. В методике предусмотрены анализ вероятностного характера и возможность практического одновременного возникно-

вения и распространения встречных/восходящих разрядов с различных элементов наземных объектов. Зарождение восходящего лидера связано с наведением заряда на проводящем заземленном теле электрическим полем грозового облака, зарядом приближающегося к земле нисходящего лидера и усилением электрического поля вблизи элементов конструкции наземного объекта. Если рассматривать объект произвольной формы, то это места (элементы) объекта с наименьшим радиусом кривизны.

Решение задачи для линий электропередачи в рамках трехмерного моделирования позволяет изучить возможность возникновения встречного лидера не только с фазных проводов и молниезащитных тросов, но и с опор линии. На опоре, в первую очередь, встречный лидер может возникнуть на ее вершине и концах траверс. Количество исследуемых мест (точек) на опоре определяется ее типом.

Исследована возможность одновременного возникновения нескольких встречных лидеров с фазных проводов и тросов, при этом считается, что на одном и том же проводе (тросе) вдоль пролета линии может быть выбрано несколько «опасных» мест (точек) (рис. 2). Расстояние между указанными точками зависит от длины пролета ВЛ. В отличие от двумерной модели принято во внимание изменение высоты подвеса проводов (тросов) вдоль пролета ВЛ.

Возможное изменение природно-климатических условий в районах прохождения трассы линии, к ко-

торым относится интенсивность грозовой деятельности n_0 , учитывается при расчете числа ударов молнии в элементы ВЛ для ее пролета. Зная количество пролетов, входящих в участки трассы, на которых n_0 не меняется, можно легко найти поражаемость линии на разных участках. Аналогичный подход может быть использован при изменении характеристик грунта по трассе.

Для учета топографии трассы линии при определении ее поражаемости выделены следующие расчетные случаи, когда линия проходит по равнинной местности (рис. 3, а) и по холмистой/горной местности, при этом выделяются три возможные ситуации расположения опор: опора на вершине холма/горы (рис. 3, б), внизу (в ущелье) (рис. 3, в) и на склоне (рис. 3, г).

Для равнинной (как и для холмистой местности) высота проводов/тросов относительно земли вдоль пролета меняется за счет их провисания. Характер провисания отличается при одинаковой высоте подвеса провода на опорах и в случае, когда высота подвеса на соседних опорах различается. В ситуации, характерной для больших переходов, например, когда линия проходит в горном районе и пересекает ущелье, изменение высот подвеса проводов в пролете происходит не только за счет провисания проводов, но и благодаря более сложному рельефу местности вдоль трассы.

Если рядом с линией на расстоянии, не превышающем размеры расчетной области, находятся насаждения или какие-либо промышленные и гражданские здания

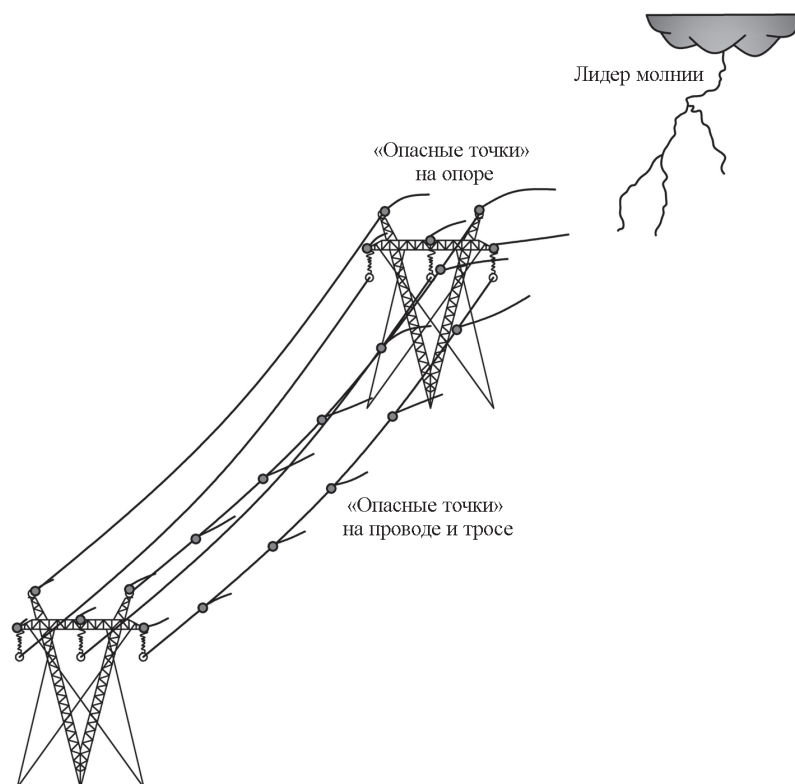


Рис. 2. Выбор «опасных» точек на опорах, проводах и тросах пролета исследуемой ЛЭП

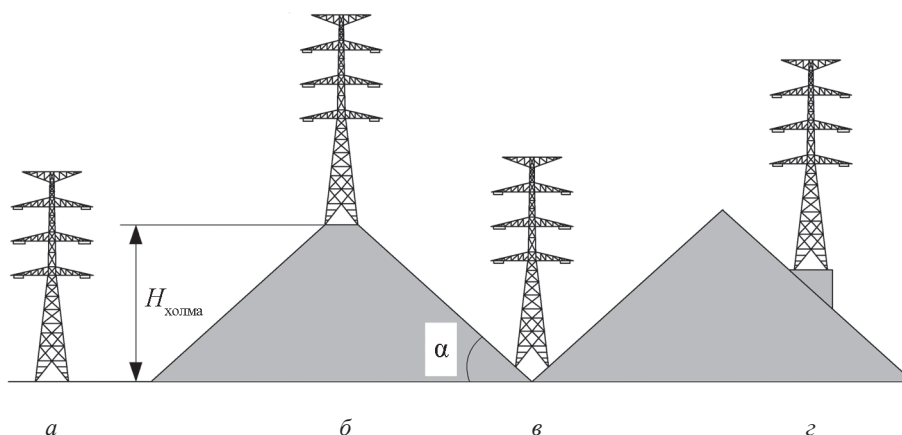


Рис. 3. Основные расчетные случаи расположения опор по трассе ВЛ:

a — линия проходит по равнинной местности; *б* — опора на вершине холма/горы; *в* — опора внизу (в ущелье); *г* — опора на склоне холма/горы

и сооружения, то они могут повлиять на поражаемость ВЛ. При появлении объектов около них могут создаваться условия для возникновения с них встречных разрядов, что, в свою очередь, ведет к перераспределению ударов молнии между объектами и элементами ВЛ, а следовательно, к уменьшению числа ударов в ЛЭП. В методике предусмотрена возможность учета лесных массивов, лесополос, плотных застроек и явно выделяющихся по высоте наземных объектов башенного типа. При этом на объектах отмечены «опасные» точки, имеющие наименьший радиус кривизны, откуда может возникнуть встречный разряд: углы и угловые поверхности зданий и границы лесных массивов. В случае протяженного объекта, находящегося вблизи трассы исследуемой ВЛ (например, лесного массива), «опасная» точка на нем выбирается под головкой отрицательного нисходящего лидера молнии.

На начальном этапе для каждого «опасного» места конструкции ЛЭП проверяется выполнение условия для возникновения стримерного разряда, заключающееся в превышении напряженности электрического поля на его поверхности некоторого критического значения $E_{кр}$, определяемого с учетом формы и размеров исследуемого элемента. Только при выполнении данного условия рассматривается возможность дальнейшего перехода стримерного разряда в восходящий лидер.

В основу вероятностного подхода к условиям перехода вспышки стримерной короны в восходящий лидер предложено положить установленный при экспериментальных и теоретических исследованиях вывод [1, 2, 10, 11], что одним из ключевых факторов, влияющих на вероятность перехода стебля импульсной стримерной короны в восходящий лидер, является заряд Q_{cor} , протекший через ее основание. Можно использовать обобщенные результаты обширных экспериментальных исследований указанного явления, полученные на кафедре ТЭВН «НИУ «МЭИ» с использованием искусственных грозовых ячеек.

Предлагаемый вероятностный критерий возникновения восходящего лидера заключается в следующем. При фиксированном расположении нисходящего отрицательного лидера молнии после формирования очередной его ступени рассчитывается распределение электрического поля, создаваемого нисходящим отрицательным лидером и грозовым облаком в пространстве вблизи критических точек ВЛ (фазных проводов, грозозащитных тросов, элементов опор, объектов вблизи ЛЭП), с которых может стартовать восходящий встречный лидер.

По полученным распределениям электрического поля для всех критических точек вычисляется заряд импульсной стримерной короны Q_{cor} . С учетом того, что значение средней напряженности электрического поля внутри образовавшейся стримерной зоны для положительных разрядов $\approx 4...5$ кВ/см, заряд вспышки импульсной стримерной короны может быть приблизительно найден по формуле [1]:

$$Q_{cor} \approx K_Q \frac{l_S^2}{2} (E_{str}^+ - E_1),$$

где E_1 — напряженность электрического поля в точке поверхности «опасного» элемента в его отсутствие.

Длина стримерной зоны может быть вычислена по выражению, аналогичному (1). По рассчитанному значению заряда вспышки импульсной стримерной короны, формирующейся в пространстве вблизи выбранных критических точек ВЛ и элементов трассы, определяется вероятность успешного перехода ее в восходящий положительный лидерный разряд, что соответствует вероятности старта восходящего встречного лидера с данного элемента объекта по направлению к нисходящему ступенчатому лидеру.

Для выявления места удара молнии в ВЛ необходимо рассматривать возможность развития стримерных вспышек с различных элементов линии (провод, трос, элементы опоры), последующий переход этих

вспышек в лидеры, стабильное или затухающее прораствание встречных лидеров с элементов конструкции и успешный перехват встречным лидерным разрядом нисходящего лидера молнии.

Входные параметры модели развития встречного лидера — средняя напряженность электрического поля в стримерной зоне E_{str}^+ встречного лидера, установившаяся напряженность электрического поля в канале встречного лидера E_{∞} , скорость распространения восходящего лидера v и распределение заряда вдоль канала лидера q .

При движении нисходящего лидера к земле на каждой ступени находится распределение электрического поля в области около «опасных» точек, и снова определяется вероятность того, что с элементов рассматриваемых объектов может возникнуть восходящий лидер следующей группы. Каждому последующему формированию ступени нисходящего лидера существует своя серия (группа) восходящих лидеров с соответствующей вероятностью возникновения с имеющихся «опасных» точек. Одновременно с процессом возникновения изучается процесс прораствания серий (групп) встречных разрядов, уже возникших с определенной вероятностью на предыдущих ступенях, уточняется возможная траектория их движения. При этом для каждой серии учитывается эффект возможного экранирования одного встречного лидера другими соседними. Какой из лидеров будет устойчиво развиваться, зависит во многом от параметров нисходящего лидера: его точки старта, тока и траектории.

Суммируя значения вероятностей возникновения и устойчивого развития встречного лидера с фиксированными параметрами (ток молнии и траектория), для каждого спуска нисходящего лидера для каждой «опасной» точки устанавливается вероятность ее поражения молнией, при этом суммарная вероятность поражения всех элементов объекта и поверхности земли должна быть равна 1. Изучая весь возможный диапазон токов молнии, многообразие их траекторий и меняя возможные точки старта нисходящих лидеров путем суммирования по всем указанным параметрам, вычислим число

Литература

1. **Lightning** Protection // IET Power and Energy. Ser. 58. London: Institution of Eng. and Technol., 2010.
2. **Evaluation** of Lightning Shielding Analysis Methods for EHV and UHV DC and AC Transmission Lines. CIGRE, 2017.
3. **Калугина И.Е.** Развитие вероятностной методики расчета молниезащищенности воздушных линий электропередачи // Электричество. 2011. № 11. С. 25—30.
4. **Гундарева С.В., Калугина И.Е., Темников А.Г.** Об особенностях методики расчета поражаемости наземных взрывоопасных объектов молнией // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 10. С. 139—141.

ударов молнии в k -ю «опасную» точку объекта за определенный период времени:

$$n_{yuk} = n_0 \Delta I_m \Delta \gamma_{lz} \sum_{g=1}^G S_g \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^M f(\gamma_{lz}) f(I_m) P_{об,jgk},$$

где n_0 — интенсивность грозовой активности; j — номер отрицательного нисходящего лидера молнии с заданными параметрами; M — число нисходящих отрицательных лидеров молнии с заданными значениями тока молнии I_{mj} и углом распространения $\gamma_{lзj}$; ΔI_m , $\Delta \gamma_{lz}$ — шаги интервалов, на которые разбиты возможные диапазоны тока молнии и угла подхода лидера молнии к земле относительно вертикали; $\Delta I_m \sum_j^M f(I_m)$, $\Delta \gamma_{lz} \sum_j^M f(\gamma_{lz})$ — нормирование вероятностей появления молнии с током I_{mj} для всего расчетного диапазона токов и вероятностей подхода молнии к земле под углом $\gamma_{lзj}$ для всего расчетного диапазона углов; g , S_g — номер и площадь ячейки расчетной области; G — число ячеек, на которое разбита расчетная область; F — число двумерных плоскостей, в которых рассматривается распространение лидера молнии к земле.

Число ударов в провода ВЛ определяется как сумма числа ударов в «опасные» точки, находящиеся на проводах (аналогично для опор, тросов, различных объектов трассы линии).

В вычислениях учитывается факт изменения напряжения на проводах линии за период путем определения средней вероятности прорыва молнии на провода линии, соответствующей разным значениям рабочего напряжения.

Заключение

Методика и разработанный на ее основе программный комплекс позволяют определять распределения ударов молнии между элементами ЛЭП (опорами, фазными проводами, молниезащитными тросами) и объектами вдоль трассы ВЛ, места ударов и их вероятности внутри каждого структурного элемента линии, характерные токи молнии, обеспечивающие поражение молнией каждого структурного элемента ЛЭП.

References

1. **Lightning** Protection. IET Power and Energy. Ser. 58. London: Institution of Eng. and Technol., 2010.
2. **Evaluation** of Lightning Shielding Analysis Methods for EHV and UHV DC and AC Transmission Lines. CIGRE, 2017.
3. **Kalugina I.E.** Razvitie Veroyatnostnoy Metodiki Rascheta Molniezashchishchennosti Vozdushnykh Liniy Elektroperedachi. Elektrichestvo. 2011;11:25—30. (in Russian).
4. **Gundareva C.B., Kalugina I.E., Temnikov A.G.** Ob Osobennostyakh Metodiki Rascheta Porazhaemosti Nazemnykh Vzryvoopasnykh Ob'ektov Molniey. ZHTF. 2016;86;10:139—141. (in Russian).

5. Гайворонский А.С., Карасюк К.В. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения // Научный вестник НГТУ. 1998. № 2 (5). С. 9—32.

6. Li Z., Zeng R., Zhuang C., Yin H. Study on the Influence of Space Charge on the Upward Leader Emerging From the Conductors of UHVDC Transmission Lines // IEEE Trans. Power Delivery. 2015. V. 30. No. 1. Pp.106—113.

7. Mazur V., Ruhnke L.H., Bondiou-Clergerie A., Lalande P. Computer Simulation of a Downward Negative Stepped Leader and Its Interaction with a Ground Structure // J. Geophysical Res. 2000. V. 105. No. D17. Pp. 22361—22369.

8. Filipe N. e. a. A Methodology for Estimating Transmission Lines Lightning Performance Using a Statistical Approach // Proc. 33rd Intern. Conf. Lightning Protection. Lisbon, 2016. P. 105.

9. Lightning Parameters for Engineering Applications. CIGRE, 2013.

10. Vidal F. e. a. Modeling of the Air Plasma Near the Tip of the Positive Leader // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. Pp. 1339—1349.

11. Темников А.Г., Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенок Т.К. О критерии возникновения восходящего лидера с наземных объектов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 3. С. 42—48.

5. Gayvoronskiy A.S., Karasyuk K.V. Novye Metodicheskie Printsipy Otsenki Grozoupornosti Vozdushnykh Liniy Elektropredachi Vysshikh Klassov Napryazheniya. Nauchnyy Vestnik NGTU. 1998;2 (5):9—32. (in Russian).

6. Li Z., Zeng R., Zhuang C., Yin H. Study on the Influence of Space Charge on the Upward Leader Emerging From the Conductors of UHVDC Transmission Lines. IEEE Trans. Power Delivery. 2015;30;1:106—113.

7. Mazur V., Ruhnke L.H., Bondiou-Clergerie A., Lalande P. Computer Simulation of a Downward Negative Stepped Leader and Its Interaction with a Ground Structure. J. Geophysical Res. 2000;105;D17:22361—22369.

8. Filipe N. e. a. A Methodology for Estimating Transmission Lines Lightning Performance Using a Statistical Approach. Proc. 33rd Intern. Conf. Lightning Protection. Lisbon, 2016:105.

9. Lightning Parameters for Engineering Applications. CIGRE, 2013.

10. Vidal F. e. a. Modeling of the Air Plasma Near the Tip of the Positive Leader. IEEE Trans. Plasma Sci. 2002;30:1339—1349.

11. Temnikov A.G., Gundareva S.V., Kalugina I.E., Gerastenok T.K. O kriterii Vozniknoveniya Voskhodyashchego Lidera s Nazemnykh Ob'ektov. Pis'ma v ZHTF. 2014;40;3:42—48. (in Russian).

Сведения об авторах:

Калугина Инна Евгеньевна — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: bgb85@yandex.ru

Темников Александр Георгиевич — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Гундарева Светлана Вячеславовна — младший научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: gundareva-sv@rambler.ru

Черненко Леонид Леонидович — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений, заведующий НИЛ «Молниезащиты летательных аппаратов» НИУ «МЭИ», e-mail: ChernenskyLL@mpei.ru

Information about authors:

Kalugina Inna E. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: bgb85@yandex.ru

Temnikov Aleksandr G. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Gundareva Svetlana V. — Junior Researcher of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: gundareva-sv@rambler.ru

Chernensky Leonid L. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Head of the Research Laboratory «Lightning protection of aircraft», NRU MPEI, e-mail: ChernenskyLL@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 28.01.2020

The article received to the editor: 28.01.2020