

Развитие вероятностной методики расчета молниезащищенности воздушных линий электропередачи¹

КАЛУГИНА И.Е.

Представлена усовершенствованная методика оценки молниезащищенности воздушных линий электропередачи, основанная на описании процесса развития и ориентации молнии по направлению к наземному объекту. Реализация методики в рамках трехмерной задачи позволяет учитывать реальное провисание проводов и тросов в пролете линии и наличие опор различного конструктивного исполнения, что, безусловно, увеличивает достоверность полученных оценок.

Ключевые слова: молниезащищенность, воздушная линия, вероятностная методика, лидер молнии, грозовые отключения

Грозовые отключения воздушных линий электропередачи по-прежнему являются серьезным фактором нарушения бесперебойного электроснабжения потребителей. При нормальной эксплуатации линий они могут достигать 30 и даже 50% общего числа автоматических отключений. Развитие промышленных технологий, особенно в условиях рыночных отношений, ужесточает требования к бесперебойности электроснабжения. Даже успешные автоматические повторные включения (АПВ), ранее считавшиеся одним из средств молниезащиты, уже не принимаются во внимание многими потребителями, получающими технологический сбой во время бестоковой паузы.

Традиционные подходы к оценке молниезащищенности, основанные на полуэмпирических зависимостях, электрогеометрических построениях, часто не позволяют объективно оценить молниезащищенность объекта (ЛЭП), а также не могут дать интересующую проектировщиков информацию о влиянии различных факторов на его грозопоражаемость. Определение истинных причин низкой грозоупорности объекта (ЛЭП), а также адекватных мер ее повышения требует создания новых методов расчета, основанных на описании реальных физических процессов развития молнии в направлении наземных объектов. За рубежом исследования в этом направлении ведутся достаточно активно. Хорошо известны попытки создания подобных моделей на основе электрогеометрического метода [1–4], однако наиболее перспективным является

An improved method for estimating the lightning protection degree of overhead power lines is presented, central to which is a description of the discharge development process and its orientation toward an on-ground object. Implementation of the method within the framework of a 3D problem makes it possible to take into account the actual sag of conductors and grounding wires in a span and power line towers of different designs, due to which surely more reliable assessments are obtained.

Key words: degree of lightning protection, overhead line, probabilistic method, leader, lightning-induced disconnections

вероятностный метод расчета [5]. Его преимущество перед электрогеометрическим методом в том, что он позволяет рассматривать разрядные процессы, возникающие при поражении молнией объекта.

В связи с этим для оценки молниезащищенности линий представляется важным дальнейшее совершенствование вероятностной методики с учетом описания процесса развития молнии и ориентации ее в направлении наземного объекта (ЛЭП). Реализация методики для трехмерной модели линии электропередачи позволит исследовать реальное провисание проводов и тросов в пролете линии, что значительно расширит ее возможности и повысит достоверность полученных результатов.

Создание методики основано на существующих в этом направлении разработках [6–8].

Развитие вероятностной методики расчета. Физические представления о процессах развития молнии и поражения объекта базируются в основном на результатах полевых и фотографических измерений и данных, полученных при изучении лабораторных искровых разрядов в длинных воздушных промежутках в предположении их идентичности молниевым. В результате было установлено, что основной ущерб наземным объектам наносят отрицательные нисходящие молнии. Картину развития отрицательной молнии можно представить следующим образом: потенциал между облаком и землей за счет электризации облака растет до тех пор, пока лидер-пилот не даст старт проводящему каналу к земле, который движется с короткими интервалами ступенями вниз, пока не встретится с лидерами (встречными разрядами) с наземных объектов

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

наибольшей вероятностью может возникнуть встречный лидер. Зарождение восходящего лидера связано с наведением заряда на проводящем заземленном теле электрическим полем грозового облака и зарядом приближающегося к земле нисходящего лидера. Если рассматриваемый объект произвольной формы, то это места (элементы) объекта с наименьшим радиусом кривизны.

Решение задачи для линий электропередачи в рамках трехмерной модели позволяет рассмотреть возможность возникновения встречного лидера не только с фазных проводов и молниезащитных тросов, но и с опор линии. У опоры встречный лидер может возникнуть, в первую очередь, на вершине и концах траверс; число рассматриваемых мест (точек) на опоре определяется ее типом. Трехмерное моделирование задачи также позволяет учесть реальное провисание проводов и тросов в пролете ВЛ или изменение их высоты вдоль пролета.

Для определения вероятности возникновения встречного лидера вблизи каждого из этих элементов выделяются участки определенной длины. В результате расчета поля от зарядов лидера и от рабочего напряжения на проводах ВЛ определяется разность потенциалов на выделенных участках вблизи каждого элемента. Критерием возникновения и устойчивого развития встречного лидера в [5–8] предлагается считать превышение разности потенциалов на выделенных участках значения 50%-го разрядного напряжения промежутка той же длины $U_{50\%}$. В методике значения выделенных промежутков около объектов S принимаются равными 10 м, соответственно значения $U_{50\%}$ у элементов линии составляют 2,3 МВ. В оценочных расчетах у поверхности земли $U_{50\%}$ принимается равным 3 МВ, учитывая тот факт, что в большинстве случаев условия возникновения встречного лидера с земли более тяжелые, чем с проводов линии.

Наличие разброса значений пробивных напряжений выбранных промежутков s позволяет учесть вероятностный характер процесса возникновения встречного лидера, когда лидер с некоторой вероятностью может стартовать с любого элемента линии (опоры, троса, провода), а также с поверхности земли. Развивающийся лидер нисходящей молнии, элементы ВЛ и поверхность земли рассматриваются как многоэлектродная система, поражение элементов которой определяется вероятностными соотношениями, аналогичными тем, которые характеризуют распределение пробоев в параллельных промежутках.

Выражение для вероятности возникновения встречного лидера с k -го элемента при условии,

что он не возникнет с остальных и с земли, имеет вид:

$$P_k = \int_0^\infty f_k(U) \prod_{m=1}^n [1 - F_m(Y_m U)] [1 - F_3(Y_3 U)] dU, \quad (1)$$

где n – число рассматриваемых точек элементов объекта (ВЛ); $F_m(Y_m U)$, $F_3(Y_3 U)$ – соответствующие интегральные функции распределения пробивных напряжений промежутков DX_m , DX_3 ; $Y_m = U_m / U_k$; $Y_3 = U_3 / U_k$; U_m , U_k , U_3 – напряжения на участках DX_m , DX_k , DX_3 прямой, соединяющей головку лидера с рассматриваемыми точками линии при $m^1 k$ и поверхностью земли соответственно (рис. 2).

При условии, что пробивные напряжения выде-

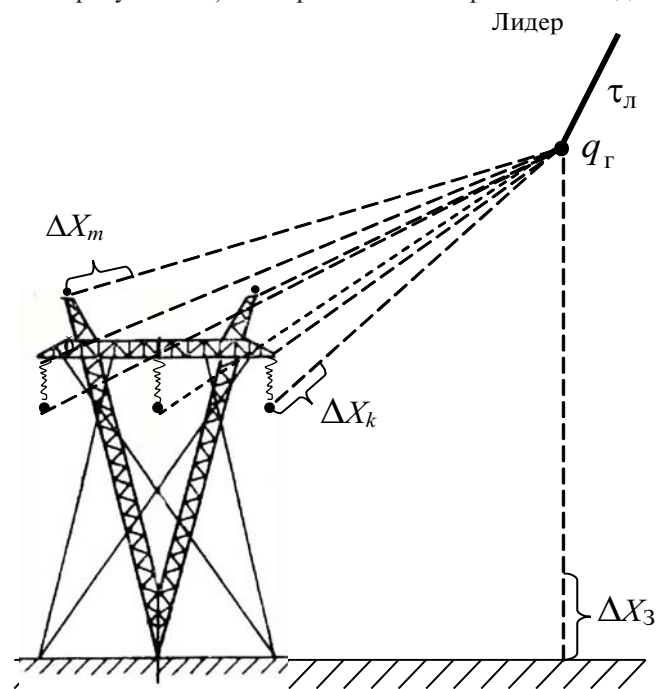


Рис. 2. К расчету вероятности прорыва молнии

ленных участков распределены по нормальному закону, выражение (1) имеет вид:

$$P_k = \int_0^\infty \frac{1}{s \bar{U}_{Dx} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U - \bar{U}_{Dx})^2}{2(s \bar{U}_{Dx})^2}} \prod_{m=1}^n \int_{\bar{U}_{Dx_m}}^{\infty} F_{\bar{U}_{Dx_m}} \frac{\partial F_{\bar{U}_{Dx_m}}}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial U} \prod_{\bar{U}_{Dx_3}}^{\infty} F_{\bar{U}_{Dx_3}} \frac{\partial F_{\bar{U}_{Dx_3}}}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial U} dU, \quad (2)$$

где \bar{U}_{Dx} , \bar{U}_{Dx_3} – математическое ожидание напряжения на участках DX_m , DX_3 ; s – среднеквадратичное отклонение пробивных напряжений, отнесенное к их средним значениям.

Рассматриваемый метод оценки вероятности прорыва молнии, использующий выражение (2), является приближенным, так как основывается на ряде допущений. Кроме уже ранее отмеченных, в расчете не рассматривается возможность одновременного возникновения встречных лидеров с нескольких точек линии или поверхности земли и, соответственно, исключается существование вероятности их одновременного или парного появления (на проводе – тросе, проводе – земле и т.д.). В качестве наиболее вероятной точки поражения на поверхности земли рассматривается только точка, расположенная под головкой нисходящего лидера молнии (рис. 2), в которой напряженность поля, создаваемая лидером молнии, наибольшая.

При данном фиксированном положении нисходящего лидера определялся ток молнии I_M , при котором суммарная вероятность поражения всех элементов линии и поверхности земли равнялась единице. Перемещение головки лидера по столбцам созданной сетки сверху вниз позволяет рассмотреть весь возможный диапазон токов молний, появление которых в пространстве около объекта (ВЛ) с определенной вероятностью может вызвать прорыв молнии на него. Наибольшим токам молнии соответствует удаленное положение нисходящего лидера.

Суммируя значения вероятностей прорыва по всем положениям нисходящего лидера, которые соответствуют различным значениям токов молнии (с учетом их вероятности), получаем общую вероятность поражения молнией объекта.

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

На основе предложенной математической модели разработан численный алгоритм и соответствующее программное обеспечение.

Численная реализация и тестирование модели.

Тестирование проводится путем сопоставления расчетных и эксплуатационных значений числа грозных отключений линии. Для тестирования выбраны две российские линии сверхвысокого напряжения ВЛ 500 и 750 кВ с достаточно большим сроком эксплуатации (не менее 30 тыс. кмлет), имеющие характерную для нашей страны конструкцию опор, что позволяет определить ее объемные характеристики и тем самым воссоздать трехмерную модель. Конструкции опор ВЛ 500 и 750 кВ представлены на рис. 3. Основные результаты расчета: число отключений линии при прорыве молнии на провода сквозь тросовую защиту $n_{пр}$ и обратных перекрытиях изоляции линии в случае

удара молнии в опору $n_{обр}$. Общее расчетное число грозных отключений определяется как $n_{гр} = n_{пр} + n_{обр}$.

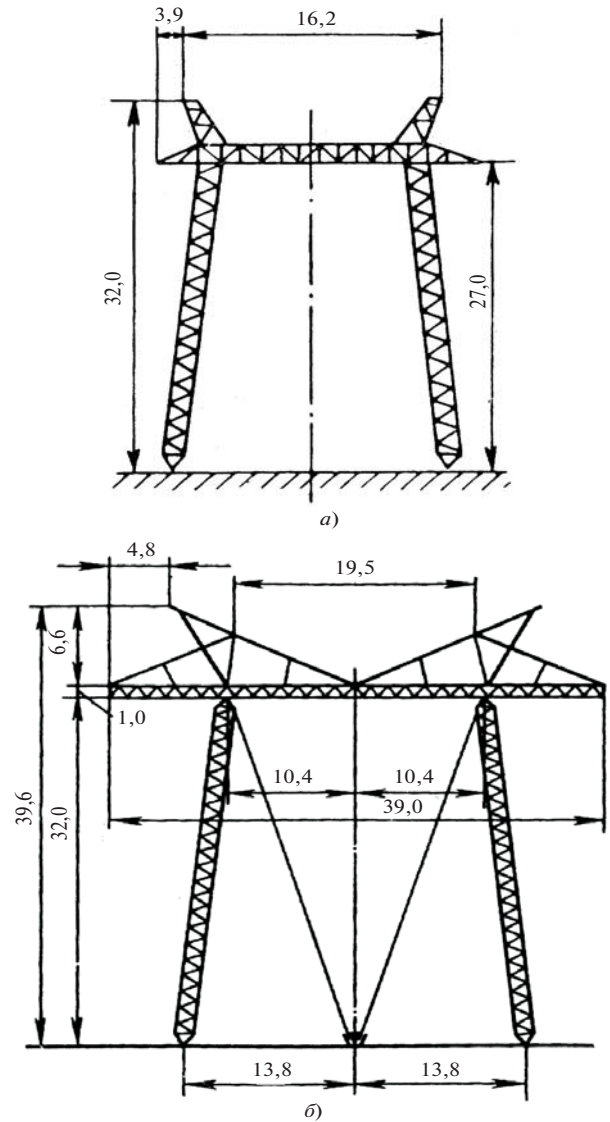


Рис. 3. Опоры ЛЭП: а – 500 кВ; б – 750 кВ

В методике не рассматриваются отключения линии, вызванные ударами молнии в тросе в средней части пролета с последующим перекрытием воздушного промежутка «трос–провод». Для действующих ВЛ доля таких отключений настолько мала, что на данном этапе их можно не учитывать.

В таблице показана молниезащитность тестируемых линий электропередачи по данным эксплуатации и результатам расчета.

Отключения на 100 км 100 гр.ч	Данные эксплуатации		Результаты расчета	
	500 кВ	750 кВ	500 кВ	750 кВ
$n_{гр}$	0,160–0,020	0,080	160	0,066
$n_{пр}$	0,120–0,150	0,072	0,099	0,056
$n_{обр}$	0,045	0,08	0,061	0,010

Расчетные оценки общего числа грозových отключений для линии 500 кВ дают совпадение с данными эксплуатации, для линий 750 кВ погрешность составляет 17,5%. Учитывая сложность моделируемых процессов, приближенность в оценках эксплуатационных данных, невозможность рассмотреть в большинстве случаев индивидуальные характеристики каждой линии (например, рельеф местности, сопротивление грунта), расхождения между эксплуатационными показателями и расчетом в пределах от 30 до 50% принято считать вполне допустимыми, поэтому полученный результат (17,5%), безусловно, следует признать хорошим. Он свидетельствует о том, что предлагаемая методика рассматривает процессы, являющиеся определяющими при поражении молнией наземных объектов.

Как уже отмечалось, результаты расчетов позволяют установить причину грозových отключений. Данные таблицы показывают, что наибольшая погрешность при расчете отключений от прорывов молнии на провода линии составляет 22%, а в результате обратных перекрытий 25%. Однако говорить об объективности эксплуатационных оценок этих отключений достаточно сложно, статистика таких данных фактически отсутствует. Поэтому, как и при сравнении общего числа грозových отключений, можно признать достаточно хорошим совпадение показателей расчета с данными эксплуатации ВЛ.

Кроме основных показателей молниезащищенности, расчет позволил получить информацию о распределении ударов между элементами конструкции ВЛ, а именно число ударов в опоры, провода, тросы линии и в землю. Анализ этих расчетных параметров может служить дополнительным подтверждением достоверности разработанной методики.

Для линии 500 кВ получено следующее распределение ударов молнии в элементы ВЛ (на 100 км и 100 грозových часов); опоры – 11,4 удара, тросы – 7,86, провода – 0,235, на рассматриваемой области вблизи ВЛ 13 ударов попадают в поверхность земли. Опора линии 750 кВ поражается почти в два раза чаще (22,2 удара), что объясняется ее большей высотой. В то же время число ударов в провода линии составляют всего 0,117, что связано с использованием опоры с меньшим углом тросовой защиты и большим превышением троса над проводом.

При тестировании методики проведены дополнительные исследования, подтвердившие, что результаты расчетов соответствуют современным представлениям о влиянии различных факторов на молниезащищенность линии. Так, при исследовании влияния напряжения на фазных проводах по-

лучены вполне ожидаемые изменения степени их поражаемости.

Выводы. 1. Разработанная методика открывает новые возможности для исследования молниезащищенности линий электропередачи и позволяет:

рассчитывать линии любых нетиповых конструкций, в том числе и с отрицательными углами защиты, что дает возможность использовать этот программный продукт при проектировании новых линий электропередачи разных классов напряжения;

определять распределение ударов молнии между элементами конструкции ЛЭП;

анализировать причины отключений эксплуатируемых линий разных классов напряжения, устанавливать истинные причины низкой молниезащищенности каждой конкретной линии и в дальнейшем разработать адекватные меры ее защиты от грозových перенапряжений;

оценивать значения токов молнии, приводящих к прямым и обратным перекрытиям изоляции. Установить характер распределения амплитуд токов молнии для ударов как в провод, так и в опору линии. Эта информация важна при выборе защитных аппаратов, устанавливаемых на ВЛ, в частности ОПН;

исследовать влияние характера трассы (орграфические особенности местности) на молниезащищенность линии.

2. Реализация методики в рамках трехмерной задачи дает возможность учитывать реальное провисание проводов и тросов в пролете линии и наличие опор различного конструктивного исполнения, что, безусловно, увеличивает достоверность полученных оценок.

3. Задачи ревизии нормативной базы и применимости стандарта МЭК к российским условиям остаются достаточно актуальными. Представленная методика дает дополнительные возможности для уточнения и разработки новых нормативных документов по молниезащите энергетических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eriksson A.J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis. – IEEE Trans. PWRD, 1987, vol. 2.
2. Mousa A.M., Srivastava K.D. Modelling of Power Lines in Lightning Incidence Calculation. – IEEE Transaction on Power Delivery, 1989, paper 89, SM776-6 PWRD.
3. Lalande P. et al. Modelling of the lightning connection process to a ground structure. – 23 Int. Conf. of Lightning Protection, Firenze (Italy), 1996.
4. Rizk F.A.M. Modelling of transmission line exposure to direct lightning strokes. – IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, vol. PWRD-5.

5. **Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.** Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.

6. **Ларионов В.П., Колечицкий Е.С., Шульгин В.Н.** Расчет вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту. – Электричество, 1981, №5.

7. **Wereshchagin I.P., Kalugina I.E.** Analysis of the main influencing factors in the ground objects affection probability calculation by lightning. – 23rd Int. Conf. of Lightning Protection, Fizenze (Italy), 1996.

8. **Калугина И.Е.** Развитие вероятностной методики расчета молниезащиты линий СВН и УВН. – Вестник МЭИ, 2008, № 1.

Автор: Калугина Инна Евгеньевна окончила электроэнергетический факультет (ныне Институт электроэнергетики) Московского энергетического института (МЭИ) в 1985 г. В 2003 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка уточненной методики расчета числа ударов и прорывов молнии через тросовую защиту линий электропередачи» в МЭИ. Доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений МЭИ.