

Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда

ШИШИГИН С.Л., МЕЩЕРЯКОВ В.Е., ШИШИГИН Д.С.

Разработан метод расчета внешней молниезащиты, в основу которого принято положение Г.Н. Александрова о связи вероятности поражения молнией объекта и его наведенного заряда. Зона захвата молнии индивидуальна для каждого объекта и определяется из условия равного относительного наведенного заряда объекта. Метод адекватно отражает основные закономерности, установленные российскими нормами, и применим для сложных объектов подобно методу катящейся сферы.

Ключевые слова: молниезащита, метод катящейся сферы, метод наведенного заряда, зона захвата, зона защиты

Удары молнии продолжают наносить ущерб многим объектам народного хозяйства несмотря на строгое соответствие проектных решений действующим стандартам молниезащиты. Надо признать, что существующие методы и компьютерные программы расчета внешней молниезащиты все еще не удовлетворяют требованиям практики.

Расчеты молниезащиты по стандарту МЭК 62305-3 (далее МЭК) проводятся методом защитного угла, методом катящейся сферы (МКС) и методом защитной сетки. Эффективность этих методов обоснованно ставится под сомнение в [1] и ряде других работ.

Российские нормативные документы по молниезащите – РД 34.21.122–87 (далее РД) и СО-153–34.21.122–2003 (далее СО) – устанавливают зоны защиты типовых молниеотводов относительно поверхности земли без учета влияния формы и размера защищаемого объекта, базируясь на экспериментальных данных А.А. Акопяна и расчетах вероятностным (иначе статистическим) методом [2].

В ходе крупномасштабных экспериментов по исследованию молниезащиты [3, 4] установлено, что зона защиты определяется высотой активной части молниеотводов, возвышающихся над объектом, а также формой и размерами защищаемого объекта. Эти результаты легли в основу норм ВСП 22-02-07/МО РФ (далее ВСП). Таким образом, зона защиты каждого объекта индивидуальна, а понятие типовых зон защиты молниеотводов теряет смысл.

Известно, что высота и размеры объекта – определяющие факторы стягивания молнии. Согласно [5, 6] геометрические параметры определяют наведенный заряд объекта в поле развивающегося лидера молнии, который и является первичным параметром для расчета молниезащиты. Отсюда несомненный интерес к работе [6], где представлен ме-

тод расчета молниезащиты на основе наведенного заряда.

Метод Г.Н. Александрова базируется на положении, согласно которому вероятность поражения молнией любого объекта определяется относительным значением заряда, наведенного на объекте развивающимся лидером молнии:

$$p_a = Q/q, \quad (1)$$

где q – заряд лидера; Q – наведенный заряд объекта с молниеотводами.

Расчет вероятности прорыва молнии по методу Г.Н. Александрова проводится в два этапа. На первом этапе определяется положение поверхности равновероятного появления лидера молнии $p_a = \text{const}$, минимальное расстояние от которой до элементов объекта (включая молниеотводы) соответствует длине стримеров лидера молнии. Назовем эту поверхность зоной захвата. Лидер молнии, достигший ее поверхности, поражает систему объект – молниеотводы. На втором этапе определяется вероятность прорыва молнии на основе принципа эквидистантности, согласно которому молния поражает ближайший объект. Исследуются все точки зоны захвата. Точка относится к зоне прорыва молнии, если минимальное расстояние от нее до объекта меньше, чем до молниеотводов. Отношение площади зоны прорыва к общей площади зоны захвата дает вероятность p_b выбора молнией объекта из пары объект–молниеотводы. Вероятность прорыва молнии к объекту $p = p_a p_b$.

Зона захвата с условием $p_a = \text{const}$ обладает существенным преимуществом перед зоной захвата в МКС, поскольку не содержит точек, где появление лидера молнии заведомо невозможно (показано далее на примере). Она зависит от формы объекта, тока молнии и расположена ближе к объекту, чем плоскость ориентировки по вероятностному методу. Таким образом, среди существующих вариантов

зона захвата с условием $p_a = \text{const}$ дает наиболее точную стартовую позицию лидера в завершающей фазе.

Однако вероятность p_a в (1) скорее пропорциональна, чем равна относительному наведенному заряду, что следует из экспериментов [5]. Это не меняет условие $p_a = \text{const}$, поскольку значение константы не играет роли для построения зоны захвата, но не позволяет определить вероятность прорыва p .

Метод наведенного заряда (МНЗ). Будем использовать зону захвата с условием $p_a = \text{const}$ в качестве стартовой позиции для анализа разрядных процессов на основе электрогеометрической модели, что составляет идею предлагаемого метода. При построении зоны захвата в качестве расстояния до молниеотвода вместо длины стримерной зоны, используемой в методе Г.Н. Александрова, выберем дистанцию поражения, которая является основным параметром электрогеометрической модели:

$$D = 10I^{0,65}, \tag{2}$$

где I – амплитуда тока молнии (тока главного разряда).

Выбор пути разряда (в объект или молниеотвод) в статье, как и в МКС, проводится по принципу эквидистантности. Это позволяет проводить расчеты для нормируемых уровней молниезащиты объекта по стандарту МЭК, которые в последующем могут оказаться востребованными при переработке российских норм по молниезащите. Помимо этого, при реализации МНЗ может быть использован и вероятностный подход, согласно которому поражается не только ближайший к головке лидера объект [2].

Разработка численной методики построения зоны захвата потребовала решения двух задач [7].

Задача 1. Расчет наведенного заряда. Пусть заряд лидера q сосредоточен в головке. Он связан с вектором наведенных зарядов элементов объекта Q матричным уравнением

$$AQ + Bq = 0,$$

где A – квадратная матрица потенциальных коэффициентов между элементами объекта с молниеотводами; B – вектор-столбец взаимных потенциальных коэффициентов между лидером молнии и объектом с молниеотводами; объект и молниеотводы заземлены или значение их потенциала (рабочее напряжение оборудования, проводов ВЛ) пренебрежимо мало по сравнению с потенциалом лидера. Тогда вектор наведенного заряда

$$Q = -A^{-1}Bq.$$

Подставляя его в (1), получим

$$p = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{a} Q_i}{q} = \dot{a} A^{-1} B = \sum_{i=1}^N \dot{a} C_i B_i = C \times B \tag{3}$$

где $C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$ – вектор-строка, i -й элемент которого равен сумме i -го столбца матрицы A^{-1} ; N – число элементов дискретизации объекта с молниеотводами.

Таким образом, относительный наведенный заряд объекта выражается через скалярное произведение векторов, один из которых (вектор C) вычисляется один раз, что обеспечивает высокую производительность вычислений при многократных изменениях положения лидера молнии.

Найдем потенциальные коэффициенты матрицы A . Разобьем объект на стержневые элементы эквивалентного радиуса. Полагаем, что заряд каждого элемента сосредоточен на оси, линейная плотность заряда элемента $q/l = \text{const}$. Выберем расчетную точку P в середине m -го элемента. Потенциал в точке P , обусловленный зарядом k -го стержня (рис. 1),

$$j = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left[\ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y^2}} \right] = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left[\ln \frac{r_2 i + r_2}{r_1 i + r_1} \right] = aq, \tag{4}$$

где a – взаимный потенциальный коэффициент; i – единичный орт.

Собственный потенциальный коэффициент стержня радиусом R

$$a = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{l}{R}, \quad l \gg R.$$

В точечной модели лидера с зарядом q , сосредоточенным в головке, потенциал

$$j = \frac{q}{4\pi\epsilon r} = bq,$$

где b – один из потенциальных коэффициентов вектора B .

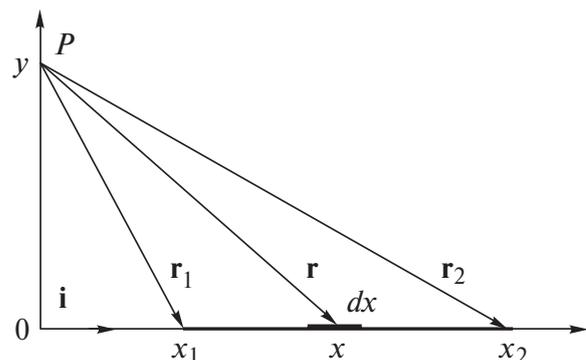


Рис. 1. К определению потенциального коэффициента стержня

Задача 2. Построение зоны захвата. Это совокупность положений точечного заряда q , создающего равный относительный наведенный заряд (или равную частичную емкость) объекта с молниеотводами $p_a = -Q/q = \text{const}$. Рассмотрены два подхода к решению задачи.

Нужно найти решение нелинейного уравнения $Q(x, y, z) = C$, где C – заданная константа на регулярной сетке узлов (число узлов может достигать десятков и сотен тысяч). Тогда для каждого узла с заданными координатами x, y определению подлежит координата z , что потребует нескольких расчетов функции в пробных точках. Как следствие – большая трудоемкость решения. Этот способ подходит для многопроцессорных вычислений, поскольку расчеты в узлах независимы друг от друга.

Другой путь дают методы построения картины электростатического поля на основе решения задачи Коши. Будем искать каркас искомой поверхности на совокупности вертикальных плоскостей (сечений). В каждой плоскости выберем двумерную локальную систему координат XOY , которую совместим с комплексной плоскостью. К задаче Коши приводит уравнение касательной к контуру при заданной координате начальной точки:

$$\frac{dz}{dt} = t = e^{ja}, \quad z(0) = z_0,$$

где z – комплексные координаты искомого контура; t – параметр, имеющий смысл длины; t – направление касательной; a – угол наклона касательной.

Решение задачи Коши проводится по шаговому алгоритму:

$$z_{k+1} = z_k + he^{ja},$$

где h – длина шага (с автоматическим изменением); $a = 0,5(a_k + a_{k+1})$ для метода трапеций.

Начальную точку z_0 выбираем над вершиной молниеотвода на расстоянии D (2). Здесь обычно имеет место перегиб функции, поэтому $a_0 = 0$ – удачное приближение угла. Шаговый процесс заканчивается, если расстояние до земли становится меньше, чем до объекта или молниеотводов.

Таким образом, зона захвата построена. Для каждой ее точки рассчитывается минимальное расстояние до молниеотводов a и до объекта b и в случае, если $a > b$, то (по принципу эквидистантности) разряд происходит в объект. Если разрядов в объект нет, то он считается защищенным с надежностью, соответствующей вероятности появления молнии с током заданного значения на дистанции поражения (2).

Далее приведены примеры, иллюстрирующие применение метода наведенного заряда при решении различных практических задач.

Двойной молниеотвод. Сравним МНЗ с МКС, который также использует электрогеометрическую модель, но другой принцип построения зоны захвата. В МКС зона захвата представляет собой совокупность сфер с центрами в вершинах молниеотводов (рис. 2). Внутренняя зона защиты получается в предположении, что лидер молнии с заданным током окажется в точке A зоны захвата (рис. 2), но именно там его появление маловероятно. В МКС не учитывается эффект расширения внутренней зоны защиты за счет взаимного влияния молниеотводов, поэтому она наименьшая среди рассмотренных вариантов расчета по различным методикам (рис. 2).

Во всех российских нормах (РД, СО, ВСП) внутренняя зона шире внешней зоны, иначе – внутренний защитный угол больше внешнего угла (рис. 2). В МНЗ взаимное влияние молниеотводов объясняется взаимодействием наведенных зарядов, количественно связанных матрицей потенциальных коэффициентов и создающих общую зону захвата. Расчеты по МНЗ для двойного молниеотвода согласуются с действующими российскими нормами, прежде всего ВСП (рис. 2).

Молниеотвод на высотном объекте (телевизионная башня, высотное здание и т.п.) по данным наблюдений не защищает объект от боковых разрядов молнии [2, 8]. Исследуем по МНЗ зону защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h при токе молнии I . Зона захвата начинается на высоте D (2) над вершиной молниеотвода, имеет сечение, близкое к эллипсу, и заканчивается в характерной точке A , где кратчайшее расстояние до молниеотвода равно кратчайшему расстоянию до земли (рис. 3,а). Из зоны захвата (рис. 3,а, кривая 1) разряды молнии происходят в вершину молниеотвода. Для высотного молниеотвода этот случай возможен при очень большом токе, когда $D(I)$ соизмеримо с h . Из зоны захвата (рис. 3,а, кривая 2) возникает также боковой разряд в молниеотвод, а из

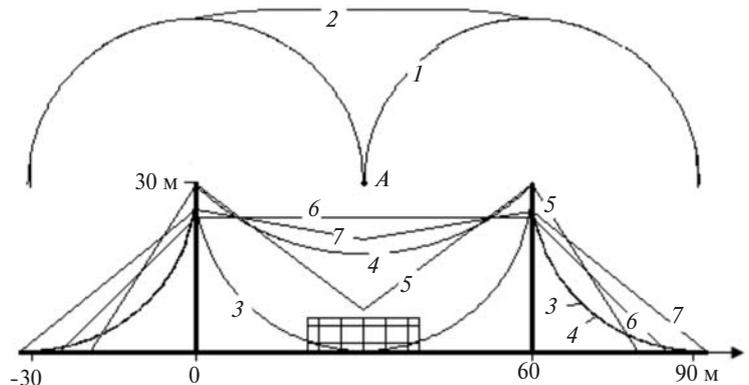


Рис. 2. Зоны захвата (1, 2) и зоны защиты (3–7) двойного молниеотвода с объектом размером 20' 20' 6 м: 1, 3 – МКС; 2, 4 – МНЗ; 5 – ВСП; 6 – СО; 7 – РД (надежность $P_H = 0,95$ для МКС, МНЗ, ВСП; $P_H = 0,99$ для СО, зона A для РД)

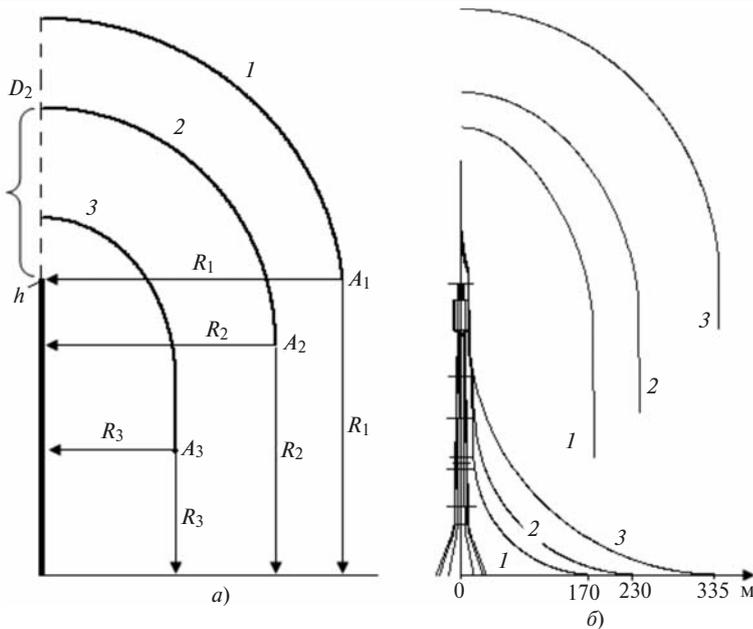


Рис. 3. Зоны захвата молниеотвода (а) при $h/D = \text{var}$; зоны захвата и защиты Останкинской башни (б) по МНЗ для тока молнии: 1 – $I = 10$ кА; 2 – 30 кА; 3 – 100 кА

зоны захвата (рис. 3,а, кривая 3), наиболее характерной для высотных молниеотводов при малых токах молнии, боковые разряды доминируют до некоторой высоты, определяемой точкой A_3 (рис. 3,а).

Результаты расчетов (рис. 3,б) коррелируют с данными многолетних наблюдений за Останкинской башней [2], согласно которым большинство нисходящих молний, поражающих башню, подходят почти горизонтально, зафиксированы удары молнии на 200–215 м ниже вершины. Удары молнии в землю зафиксированы на расстоянии вплоть до 150 м от телебашни, причем траектория таких молний может быть практически вертикальной. Аналогичные данные приведены и в [8].

Таким образом, молниеотвод на вершине высотного объекта малоэффективен для защиты от боковых разрядов нисходящих молний. Сильные молнии характеризуются большой площадью стягивания, поэтому их доля в общем числе разрядов должна возрастать. В этом принципиальное отличие от молниезащиты невысоких объектов, которые надежно защищены от сильных молний в соответствии с расчетами по существующим методикам.

Четыре молниеотвода в вершинах квадрата – характерная система молниезащиты резервуаров с нефтью. Построим зоны защиты типового резервуара РВСПА-50000 (РД-91.020.00-КТН-276-07

ОАО «Транснефть») с использованием российских и международных стандартов, а также МНЗ для двух уровней надежности (рис. 4).

Резервуар (включая зону выхлопа газов радиусом 5 м в верхней точке резервуара) защищен по РД (зона Б) и СО. По ВСП и МНЗ зона выхлопа резервуара не защищена даже на уровне $P_H = 0,9$. По МКС в зону защиты не попадает даже крыша резервуара. Еще раз подчеркнем, что МКС не учитывает взаимное влияние молниеотводов (весьма сильное для четырехкратного молниеотвода, что подтверждается результатами испытаний [3]).

Внутренняя зона защиты по МНЗ хорошо коррелирует с данными ВСП, но внешняя зона по МНЗ при $P_H = 0,99$ значительно уже. Она совпадает с зоной защиты по МКС, характеристики которого известны. При увеличении высоты мол-

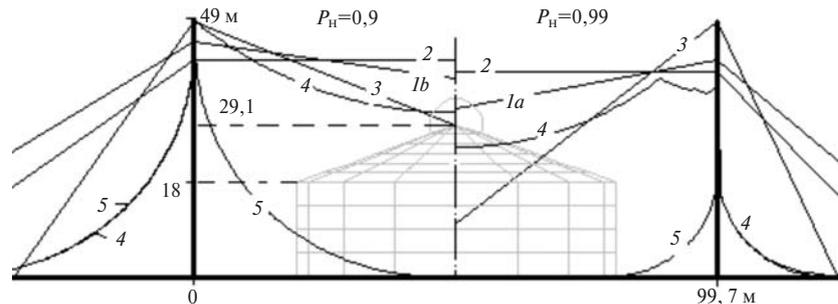


Рис. 4. Зоны защиты резервуара диаметром 60,8 м четырехкратным молниеотводом по: 1а – РД зона А; 1б – РД зона Б; 2 – СО; 3 – ВСП; 4 – МНЗ; 5 – МКС

ниеотвода более дистанции поражения (2) зона защиты по МКС не увеличивается. Это свойство, которое относится к недостаткам МКС, в данной задаче отмечается и у МНЗ.

Программное обеспечение. МНЗ совместно с методом защитного угла (с данными РД, СО, ВСП) и МКС реализованы в программе ЗУМ, интегрированной с AutoCAD [9]. Пользователь вводит 3D-геометрию объекта и задает метод расчета (норму). Результатом расчета являются уровни зоны защиты на заданных высотах, сечения зоны защиты и зона захвата для МКС и МНЗ. Прорыв молнии маркируется цветом на зоне захвата и элементах объекта. Корректировка высоты молниеотводов проводится вручную, но может быть автоматизирована в соответствии с требованиями ВСП.

Задачи внешней молниезащиты неразрывно связаны с задачами заземления, электробезопасности, ЭМС. Все они решаются в программе ЗУМ.

Заключение. По методу Г.Н. Александрова построение зоны захвата проводится по условию равной вероятности появления лидера молнии в любой ее точке, что по Г.Н. Александрову эквивалентно условию равного относительного наведенного заряда $p_a = -Q/q = \text{const}$. Этот способ построения зоны захвата относится к достоинствам метода. Однако расчет вероятности прорыва на основе p_a требует уточнения.

Разработка численной методики построения зоны захвата из условия $p_a = \text{const}$, которая используется в качестве стартовой позиции для анализа разрядных процессов на основе электрогеометрической модели, определила метод наведенного заряда. Тестовые расчеты показали, что этот метод качественно согласуется с нормами ВСП, а в частности отражает новые данные о влиянии объекта на зону защиты молниеотводов.

Метод наведенного заряда реализован в программе ЗУМ совместно с методами защитного угла (с данными РД, СО, ВСП) и катящейся сферы, что позволяет сравнивать российские и международные нормы по молниезащите.

Метод катящейся сферы базируется на неадекватно построенной зоне захвата, содержащей точки, где появление лидера молнии маловероятно, а защита от несуществующих угроз приводит к затратным проектным решениям. Российские нормы (ВСП, СО, РД) адекватнее стандарта МЭК, однако они содержат частные решения для отдельных молниеотводов. Отсюда трудности с их практическим применением для объектов с множественными, нестандартными, разнотипными молниеотводами и зданиями.

К перспективным направлениям, связанным с совершенствованием нормативной базы, относится согласование (нормировка) метода наведенного заряда с данными ВСП.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 8, pp. 4–9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базелян Э.М. Анализ исходных посылок и конкретных рекомендаций стандарта МЭК 62305 по защите от прямых ударов молнии. — Труды Первой Российской конф. по молниезащите. — Новосибирск, 2007, с. 129–139.
2. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты.—Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 222 с.
3. Куприенко В.М. Об определении вероятности поражения зданий и сооружений разрядом молнии при их защите стержневыми и тросовыми молниеотводами. —Электричество, 2012, № 11, с. 8–26.
4. Куприенко В.М. Об определении предельных размеров области защиты активной части отдельно стоящих стержневых молниеотводов. — Труды 4 Междунар. конф. по молниезащите. — СПб, 2014, с. 105–111.
5. Александров Г.Н., Кадзов Г.Д. О повышении эффективности молниезащиты. — Электричество, 1987, № 2, с. 57–60.
6. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 280 с.
7. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е. Метод расчета молниезащиты на основе электростатической модели стягивания лидера молнии. — Письма в ЖТФ, 2015, № 6(41), с. 34–41.
8. Базелян Э.М. Молниезащита высоких сооружений. — Известия РАН. Энергетика, 2005, № 3, с. 55–74.
9. Шишигин Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики. — Автоматизация в промышленности, 2014, № 9, с. 28–32.

[20.04.15]

А в т о р ы : Шишигин Сергей Леонидович в 1982 г. окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института. В 2010 г. в СПбГПУ защитил докторскую диссертацию «Разработка методов анализа и синтеза электромагнитных полей электротехнических устройств с сильными токами». Заведующий кафедрой электротехники Вологодского государственного университета (ВГУ).

Мещеряков Виталий Евгеньевич в 2012 г. окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного технического университета (ВГТУ). Аспирант кафедры электротехники ВГУ.

Шишигин Дмитрий Сергеевич в 2013 г. окончил электроэнергетический факультет ВГТУ. Аспирант кафедры автоматики и вычислительной техники ВГУ.

Calculating External Lightning Protection Using the Induced Charge Method

S.L. SHISHIGIN, V.E. MESHCHERYAKOV, AND D.S. SHISHIGIN

A method for calculating external lightning protection is developed, which is based on G.N. Alexandrov's statement about interconnection between the probability of lightning stroke to hit a facility and the charge induced on it. The lightning capturing zone is individual for each facility and is determined from the condition of equal relative charge induced on the facility. The new method adequately reflects the main regularities established by the Russian regulatory documents and is applicable for complex facilities similarly to the rolling sphere method.

Key words: lightning protection, rolling sphere method, induced charge method, capturing zone, protection zone

REFERENCES

1. **Bazelyan E.M.** – *Trudy Pervoi Rossiiskoi konferentsii po molnierzashchite – in Russ.* (Proc. 1st Russian conf. on lightning protection). Novosibirsk, 2007, pp. 129–139.
2. **Bazelyan E.M., Gorib B.N., Levitov V.I.** *Fizicheskiye i inzhenernyye osnovy molnierzashchity* (Physical and engineering foundation of lightning protection). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978, 222 p.
3. **Kupriyenko V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 11, pp. 8–26.
4. **Kupriyenko V.M.** *Trudy 4 Mezhdunarodnoi konf. Po molnierzashchite – in Russ.* (Proc. 4th Intern. Conf. On lightning protection). St. Petersburg, 2014, pp. 105–111.
5. **Aleksandrov G.N., Kadzov G.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1987, No 2, pp. 57–60.
6. **Aleksandrov G.N.** *Molniya i molnierzashchita* (Lightning and lightning protection). St. Petersburg, Publ. Polytechnical University, 2007, 280 p.
7. **Shishigin S.L., Meshcheryakov V.Ye.** *Pis'ma v ZhTF – in Russ.* Letters in Journal of Technical Physics), 2015, No. 6(41), pp. 34–41.
8. **Bazelyan E.M.** *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2005, No. 3, pp. 55–74.
9. **Shishigin D.S.** *Avtomatizatsiya v promyshlennosti – in Russ. (Automation Industry)*, 2014, No. 9, pp. 28–32.

*Authors: **Shishigin Sergei Leonidovich** (Vologda, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of the Vologda State University (VSU).*

***Meshcheryakov Vitalii Yevgen'yevich** (Vologda, Russia) – Ph. D. Student of the VSU.*

***Shishigin Dmitrii Sergeyevich** (Vologda, Russia) – Ph. Student of the VSU.*