

## Модель аналитической системы поиска повреждений на воздушных линиях вследствие грозových разрядов

А. В. Бурцев

Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2055-5874>, e-mail: [a.burtsev@tehnionord.ru](mailto:a.burtsev@tehnionord.ru)

### Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию  
11.11.2019;

получена после  
доработки  
11.12.2019

### Ключевые слова:

аналитическая модель,  
база данных,  
грозовой разряд,  
воздушные линии,  
система оповещения,  
поиск повреждения

Проблема поиска повреждений на воздушных линиях (ВЛ) вследствие грозového разряда актуальна для потребителей электроэнергии и ее поставщиков. Прямое попадание молнии в элементы ВЛ приводит к разрушению изоляторов, обрывам проводов и тросов, отключению потребителя. Основной задачей обслуживающего персонала является поиск повреждений, которые возникают после грозového разряда. Обычно для этого применяются специальные, установленные на подстанциях устройства, основанные на волновом методе, также используется визуальный метод. Предлагается модель обнаружения вероятных повреждений элементов воздушных линий путем создания подробной базы данных ВЛ региона и объединение этой базы данных с пополняемым в реальном времени архивом грозových разрядов. Такая модель в соответствии с предложенным алгоритмом позволит составить список опор, вероятно попавших под воздействие грозového разряда, выявить принадлежность этих опор к конкретным ВЛ, и оповестить обслуживающий персонал о координатах и опорах ВЛ, где возможны повреждения. Модель имеет низкие эксплуатационные издержки, легко разворачивается в любой энергосистеме, но требует достаточной точности обнаружения грозových разрядов и определения их координат. Решение проблемы точности обнаружения сводится к установке в регионе некоторого количества грозопеленгаторов той или иной системы. В статье рассматриваются данные вопросы на примере энергосистемы Мурманской области и грозопеленгаторов системы Blitzortung.

### Для цитирования

Бурцев А. В. Модель аналитической системы поиска повреждений на воздушных линиях вследствие грозových разрядов. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 477–483. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-477-483.

## Model of an analytical system for damage searching on power lines due to lightning discharges

Anton V. Burtsev

Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas FRC KSC RAS, Apatity, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2055-5874>, e-mail: [a.burtsev@tehnionord.ru](mailto:a.burtsev@tehnionord.ru)

### Article info

Received  
11.11.2019;  
received in revised  
11.12.2019

### Key words:

analytical model,  
database,  
lightning discharge,  
power lines,  
warning system,  
damage search

### Abstract

The problem of searching for damage on overhead lines due to a lightning discharge is relevant for consumers of electricity and its suppliers. A direct lightning strike into power line elements leads to the destruction of insulators, breakage of wires and cables, and a consumer disconnection. The main task of the maintenance staff is to search for damage that occurs after a lightning discharge. Usually, special devices are used, they are installed in substations and based on the wave method, the visual method is also used. The paper proposes a model for detecting likely damage to power transmission line elements by creating a detailed database on the region's power transmission line and combining this database with a real-time archive of lightning discharges. The model in accordance with the proposed algorithm will make it possible to compile a list of supports likely to be affected by a lightning discharge, to identify the affiliation of these supports to specific power lines, and to notify the maintenance personnel of these power lines about the coordinates and supports of the power lines, where damage is possible. The model has a low cost and operating cost, can be easily deployed in any power system, but requires sufficient accuracy to detect lightning discharges and determine their coordinates. The solution to the problem of detection accuracy comes down to installing in the region a certain number of lightning direction finders of a particular system. The paper considers these issues on the example of the power system of the Murmansk region and lightning direction finders of the Blitzortung system.

### For citation

Burtsev, A. V. 2019. Model of an analytical system for damage searching on power lines due to lightning discharges. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 477–483. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-477-483.

## Введение

Отключение воздушной линии (ВЛ) в связи с попаданием в ее элементы грозовых разрядов доставляет проблемы как потребителям электроэнергии, так и ее поставщикам. Неуспешно сработавшее автоматическое повторное включение (АПВ) выводит линию из работы, и обслуживающая организация вынуждена заняться поиском причины отключения ВЛ. Часто грозовой разряд при попадании в опору ВЛ разрушает изоляторы, и обслуживающий персонал производит обход ВЛ по всей ее трассе с целью визуального поиска поврежденных изоляторов. При больших протяженностях отдельных линий поиск повреждений может составить длительное время, особенно при неблагоприятных метеоусловиях, что негативно сказывается на потребителях. Конечно, на подстанциях применяются специальные приборы, использующие волновой метод. В настоящее время ведутся различные исследования, направленные на улучшение этого метода (Куликов и др., 2014), создаются теоретические модели (Куликов и др., 2015а), закладываются основы для производства более совершенных аппаратных и программных продуктов (Куликов и др., 2009; 2016; 2015б). Однако все исследования сводятся к созданию достаточно дорогих устройств, которые в огромных количествах требуются для установки на подстанциях, при этом предназначены эти приборы не только для обнаружения повреждений, вызванных грозовым разрядом.

В настоящее время существует множество систем грозопеленгации, в том числе коммерческие (Vaisala, Voltek и др.) и любительские. Системы пеленгации могут состоять из однопунктовых и многопунктовых грозопеленгаторов, и, как правило, предоставляют некоторую гарантированную точность обнаружения атмосферных разрядов.

На сегодняшний день уже разработаны методики определения места грозового разряда. Например, ряд систем работают по принципу Time-of-Arrival (Klebesadel et al., 1982): радиоволна от источника, попавшего в радиус действия точно синхронизированных между собой приемников, доходит до этих приемников, вследствие чего по времени события вычисляются координаты источника. С учетом разнообразности форм грозового разряда, его протяженности, направления развития и разветвлений точность определения может составлять от нескольких сот метров до нескольких километров. Точность напрямую зависит от плотности расположения детекторов: чем их больше расположено на конкретной территории, тем выше точность обнаружения места разряда молнии. Системы грозопеленгации, применяющие однопунктовые детекторы, основаны на приеме радиоволн, возникающих вследствие разряда молнии, в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) с помощью ЕН-антенны (Watt, 1967). По полученным данным рассчитываются координаты разряда в полярной системе координат. Конечная цель большинства грозопеленгационных систем – это повышение точности определения места грозового разряда и предупреждение о надвигающемся грозовом фронте заинтересованных служб. Одной из них является служба по обслуживанию воздушных линий.

В данной работе предлагается модель автоматического предупреждения диспетчерской службы воздушных линий о вероятном повреждении элементов ВЛ, расположенных в радиусе грозового разряда, зафиксированного системами грозопеленгации.

## Объекты и методы

В рамках данной работы объектом исследования является энергосистема Мурманской области. В этой энергосистеме применяются классы напряжения до 330 кВ. Класс напряжения 330 кВ находится под ответственностью ПАО "ФСК ЕЭС". В Мурманской области работают 12 ВЛ этого класса напряжения. Классы напряжения 35–154 кВ распределены между филиалами "Колэнерго", "Центральные электрические сети" и "Северные электрические сети" ОАО "МРСК Северо-Запада". Всего указанные предприятия обслуживают в Мурманской области 78 ВЛ классом напряжения 154 кВ, 102 линии классом напряжения 110 кВ и 90 линий классом напряжения 35 кВ. Часть линий классом напряжения 35 кВ принадлежат частным предприятиям и данных по ним не получено. Однако они составляют крайне малую часть от общего количества воздушных линий электропередачи этого класса напряжения. Расположение исследуемых ВЛ на территории Мурманской области показано на рис. 1.

Регистрация грозовой активности в исследуемом регионе осуществляется различными системами грозопеленгации. К таким системам относятся однопунктовые детекторы Voltek StormTracker, осуществляющие регистрацию грозовых разрядов с 2013 г. на базе КНЦ РАН (Бурцев и др., 2014), и немецкая любительская сеть Blitzortung. В статье (Бурцев и др., 2018) проводилось сравнение данных систем и их условия работы на территории Мурманской области, где было дано заключение, что для увеличения точности регистрации места грозового разряда целесообразно увеличить число детекторов системы Blitzortung на территории Мурманской области. К началу грозового сезона 2019 г. силами Центра физико-технических проблем энергетики Севера (ЦЭС) КНЦ РАН были установлены дополнительно 6 детекторов Blitzortung вблизи различных населенных пунктов области, в результате чего была повышена точность определения грозовых разрядов.

Предлагаемая модель автоматического предупреждения о вероятном повреждении элементов ВЛ вследствие удара молнии основана на создании электронной базы данных (БД) воздушных линий электропередачи Мурманской области с максимально подробным описанием их компонентов, и объединением этой БД с пополняемым в реальном времени архивом данных по разрядам молний в регионе. Созданная система управления базами данных (СУБД) анализирует информацию о каждом грозовом разряде, поступающем в БД, и в реальном времени ведет поиск координат опор ВЛ, попавших в зону действия грозового разряда. В случае обнаружения таких опор СУБД информирует ответственную службу о вероятном повреждении с указанием диспетчерского наименования ВЛ, номера опоры этой ВЛ, координат происшествия и его времени. Если вместе с тем в диспетчерской службе зарегистрировано аварийное отключение данной линии в это же время, то информация о проблемной опоре может стать ключом к поиску причины отключения ВЛ.

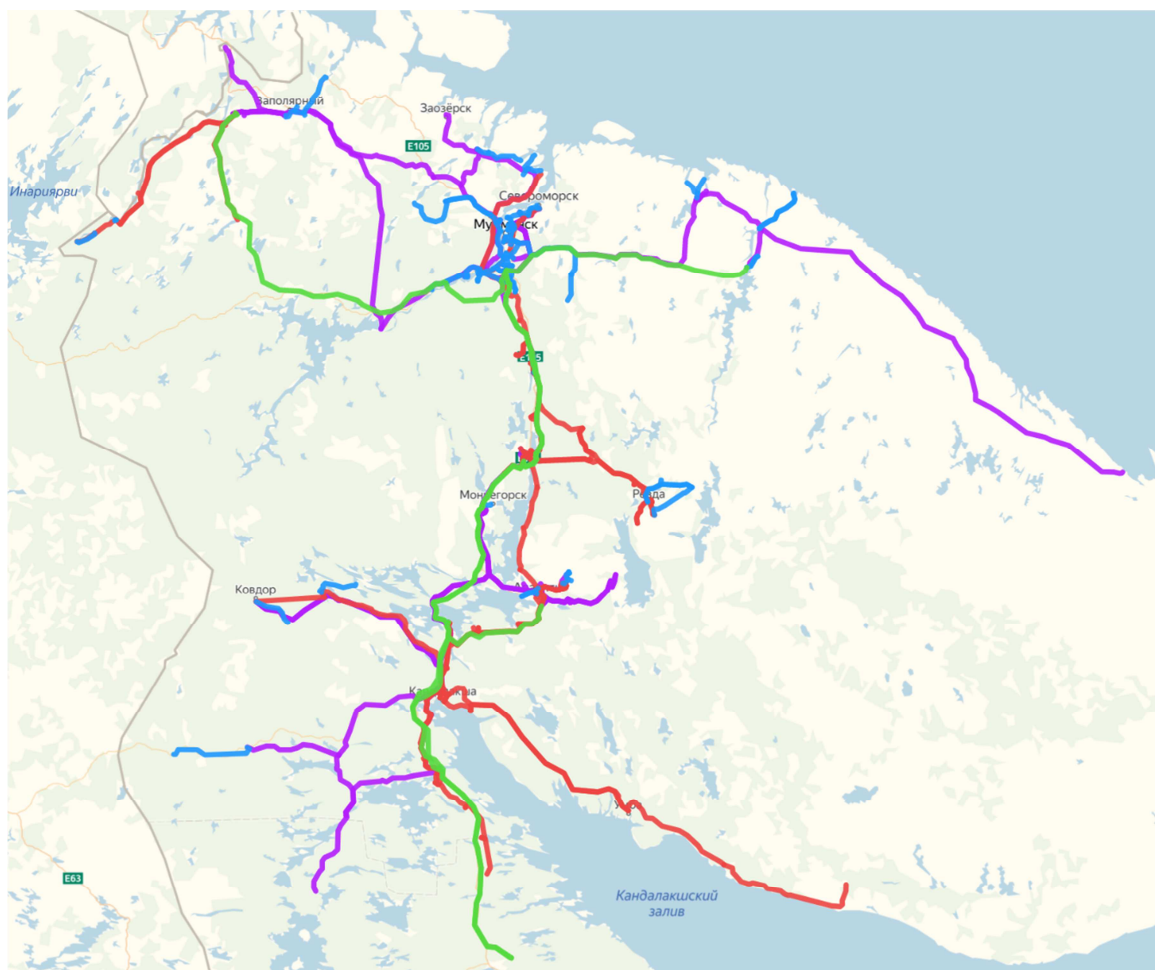


Рис. 1. Воздушные линии электропередачи Мурманской области:  
зеленый – 330 кВ, фиолетовый – 154 кВ, красный – 110 кВ, синий – 35 кВ (на 2017 год)  
Fig. 1. Overhead power transmission lines of the Murmansk Region:  
green – 330 kV, violet – 154 kV, red – 110 kV, blue – 35 kV (for 2017)

### Результаты и обсуждение

Ранее автором уже был создан прототип БД по воздушным линиям электропередачи (Бурцев, 2018). Пример интерфейса этой БД показан на рис. 2.

База данных предусматривает возможность создания полноценной физической модели воздушной линии с учетом максимально возможного числа компонентов, их физических и химических свойств. К этим компонентам относятся материалы проводов и тросов, непосредственно сами провода и тросы, изоляторы, опоры различной конструкции, их сопротивление заземления и т. д. При создании паспорта ВЛ в БД сохраняются не только географические координаты установки опор, но и их высота над уровнем моря. Такой подход необходим для всесторонней оценки молниезащиты линий электропередачи. Более привычная оценка грозоупорности ВЛ, описанная в работе (Невретдинов и др., 2015), не дает полной картины, так как в ней присутствует ряд допущений. Например, в расчете принимается средняя длина пролета и предполагается, что вся ВЛ построена в одной плоскости из одинаковых опор. В статье (Усачев и др., 2014) уже доказана

неэффективность такой модели и предлагается рассчитывать молниезащиту ВЛ, учитывая уникальность каждого пролета.

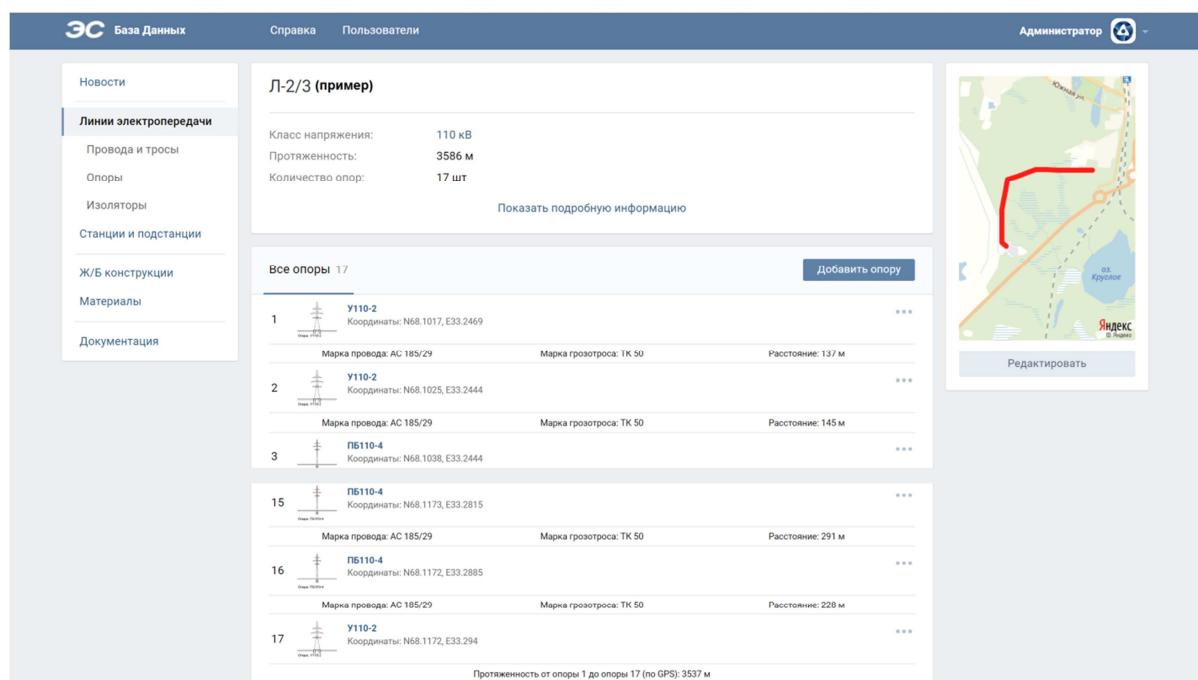


Рис. 2. Пример интерфейса базы данных по ВЛ  
 Fig. 2. An example of an overhead power line database interface

Расширение сети грозопеленгации Blitzortung силами сотрудников ЦЭС КНЦ РАН позволило получить полный доступ к данным по молниям в мире как участникам этой системы. В рамках данной работы интерес представляют разряды, происходящие над территорией Кольского полуострова. Пополнение собственной БД по молниям в регионе началось с момента установки 6 детекторов в начале 2019 года и ведется по настоящий день в режиме реального времени. Каждый грозовой разряд, поступающий в БД по молниям, несет в себе ряд базовых параметров: время события с точностью до 9 знаков после запятой; широта и долгота; максимальный интервал отклонения в наносекундах. Также можно получить ряд дополнительных параметров, которые отражают весь список детекторов с координатами установки, которые зарегистрировали событие. Отдельно разработанный программный модуль позволяет на основе загруженной в БД информации построить графики суточной грозовой активности. Пример такого графика представлен на рис. 3. График разбит на десятиминутные интервалы, в каждом полученном интервале показано число зарегистрированных грозовых разрядов.

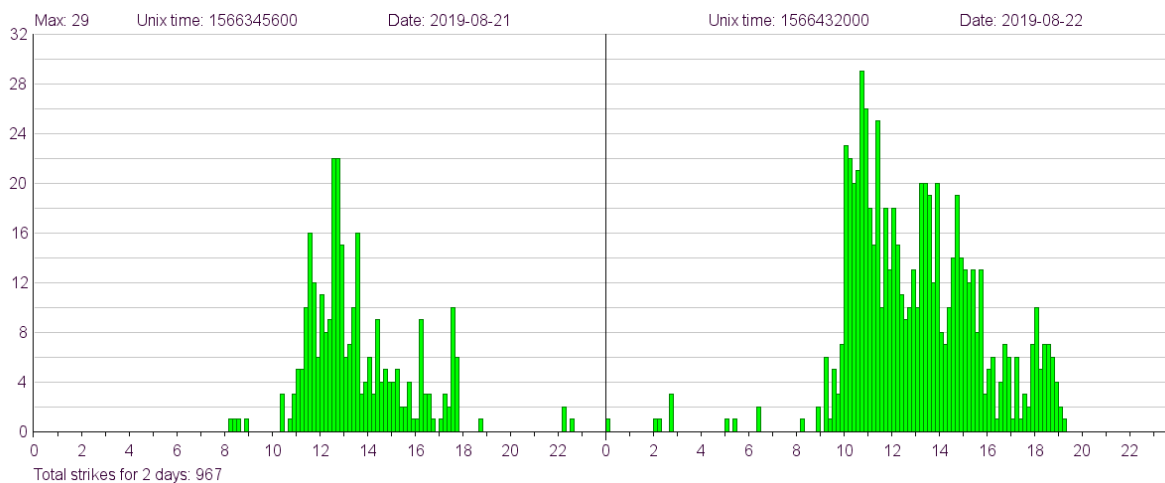


Рис. 3. График суточной грозовой активности в Мурманской области за 21–22 августа 2019 г.  
 Fig. 3. Daily lightning activity chart in the Murmansk Region for August 21–22, 2019

Основной задачей данной работы является объединение БД по воздушным ЛЭП и БД по молниям в Мурманской области в единую базу данных. Это позволит достаточно быстро производить поиск опор, попадающих в радиус поражения грозвым разрядом, и в случае их нахождения информировать заинтересованные лица.

На примере одного из разрядов, случившегося 22.08.2019 г. в 14:36:55 по Гринвичу, рассмотрим принцип работы СУБД по поиску опор. Основные параметры, необходимые для такого поиска, показаны на рис. 4.

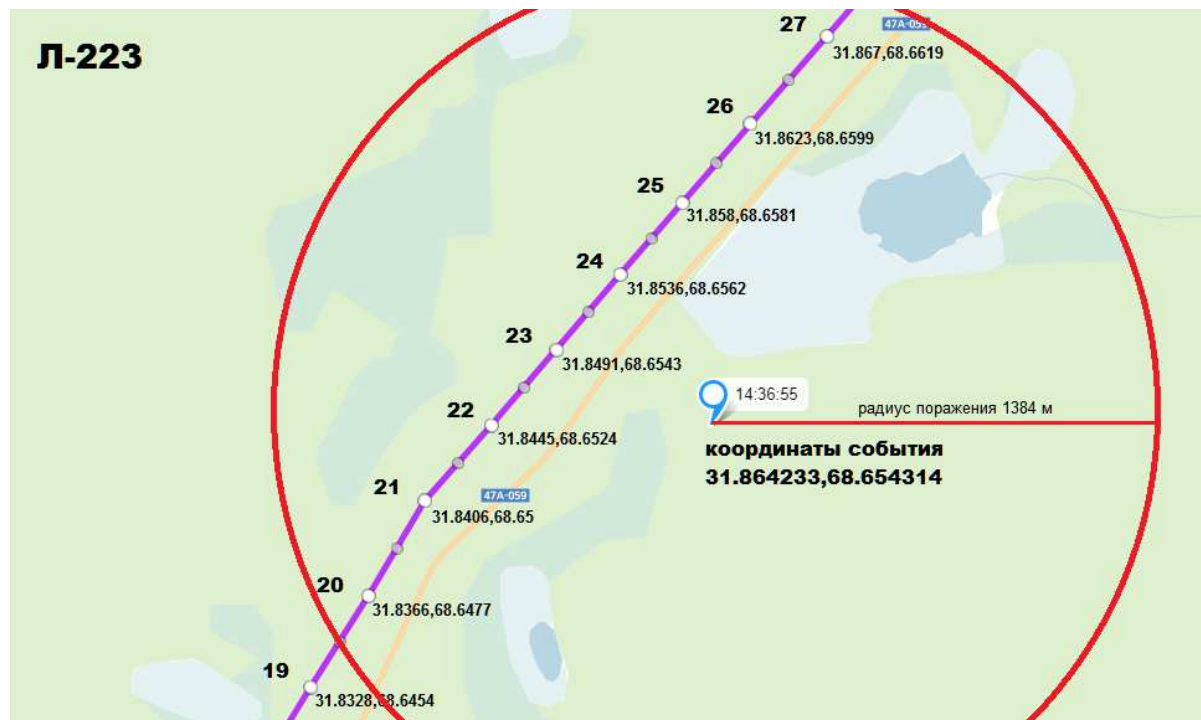


Рис. 4. Исходные данные для поиска опор, попадающих в радиус поражения грозвого разряда  
Fig. 4. Initial data for searching supports in the radius of a lightning strike

К исходным данным для поиска опор относятся следующие значения:

- координаты грозвого разряда (широта, долгота);
- радиус поражения в метрах (получается при произведении скорости распространения электромагнитных волн и максимального интервала отклонения);
- координаты опор (широта, долгота), внесенных в БД.

Работа СУБД по поиску опоры, попадающей под вероятное воздействие грозвого разряда, выполняется по следующему алгоритму:

- 1) определяется максимальный радиус поражения грозвого разряда;
- 2) с 1 % до 100 % с заранее установленным шагом от максимального значения перебирается радиус поражения;
- 3) с 1 по  $N$  перебираются все опоры, добавленные в БД;
- 4) вычисляется расстояние от грозвого разряда до текущей опоры;
- 5) сравнивается полученное расстояние с текущим радиусом поражения;
- 6) если расстояние до текущей опоры меньше, чем радиус поражения, то такая опора заносится в список подверженных воздействию опор;
- 7) с каждым шагом цикла проходит проверка наличия рассматриваемой опоры в созданном списке; если она присутствует, то происходит переход к следующей опоре;
- 8) по окончании циклов формируется полный список опор, попавших под воздействие разряда. В начале списка будут находиться наиболее близкие к разряду опоры;
- 9) просматривается список опор с целью выявления ВЛ, к которой принадлежит опора;
- 10) по окончании перебора опор формируется список ВЛ, опоры которых попали под воздействие разряда;
- 11) пересматривается список ВЛ с целью выявления обслуживающей организации;
- 12) происходит оповещение персонала организации по списку принадлежности ВЛ с указанием подверженных воздействию опор.

Схематично алгоритм представлен на рис. 5.

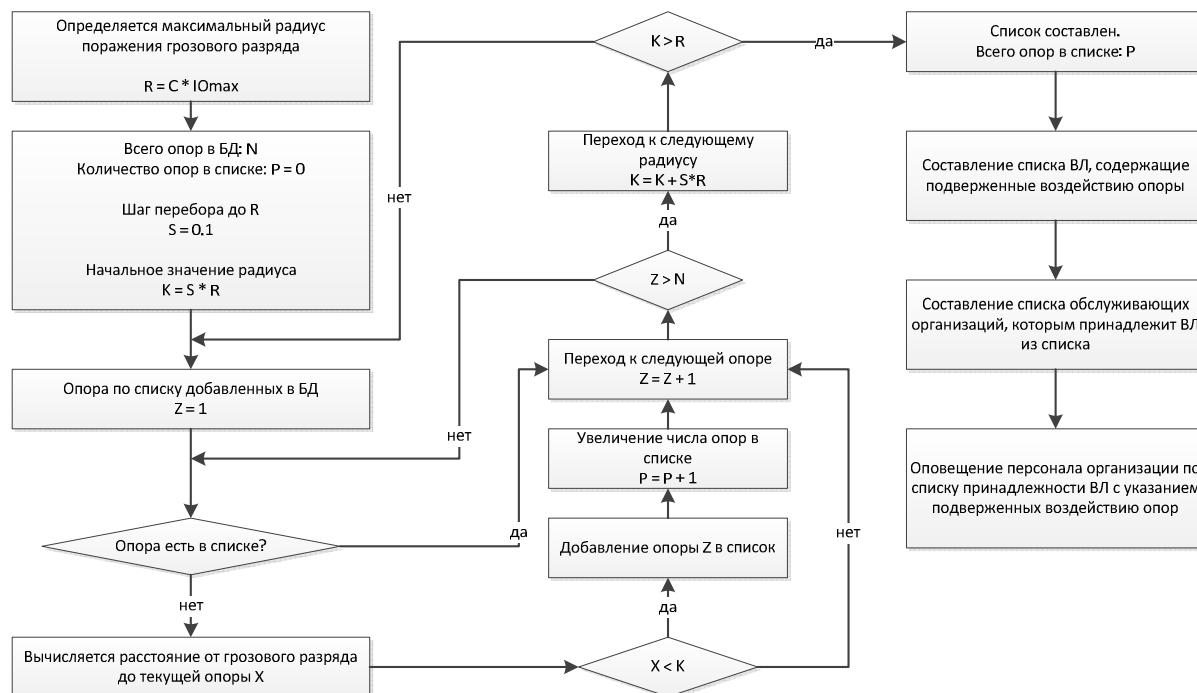


Рис. 5. Алгоритм работы СУБД по поиску опоры, попадающей под вероятное воздействие грозового разряда и оповещение заинтересованных лиц

Fig. 5. The DBMS operation algorithm for finding a support falling under the likely impact of a lightning discharge and alerting interested parties

Одним из важных параметров в работе данной модели является точность обнаружения места грозового разряда, которое определяется радиусом поражения. Если взять в качестве примера разряды, зарегистрированные 22 августа 2019 г., то за выбранный период на территории Мурманской области произошло 677 разрядов. Наименьший и наибольший вероятный радиус поражения этих разрядов находится в диапазоне от 1 130 до 4480 м, что, без сомнений, достаточно много. На точность обнаружения места разряда в большей степени влияет плотность расстановки грозопеленгаторов системы, поэтому можно предположить, что установленных детекторов в Мурманской области недостаточно. Для сравнения была выбрана территория Германии, где расположено большое количество пеленгаторов. 26 августа 2019 г. над выбранной территорией с 18:00 до 23:55 было зарегистрировано более 18 тыс. разрядов. Наибольший радиус поражения этих разрядов составляет те же 4480 м, а вот наименьший радиус составляет уже 341 м, что в среднем не больше двух пролетов при классе напряжения от 110 кВ и выше.

Следовательно, для повышения точности обнаружения мест грозových разрядов на территории Мурманской области необходимо развивать действующие системы грозопеленгации, устанавливая дополнительные детекторы.

### Заключение

В работе представлена модель аналитической системы поиска опор, подверженных воздействию грозового разряда с последующим оповещением персонала обслуживающей организации. Для полноценной работы системы необходимо объединить базу данных по воздушным линиям региона с системой грозопеленгации, работающей в режиме реального времени. Наиболее важным элементом в работе данной системы является точность обнаружения координат грозового разряда. Эта проблема решается увеличением количества детекторов грозопеленгационной системы Blitzortung в регионе.

### Библиографический список

- Бурцев А. В. Разработка основы базы данных высоковольтных электрических сетей для создания системы их контроля // Математические исследования в естественных науках : труды XV Всероссийской научной школы, Апатиты, 22 октября 2018 г. / науч. ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты, 2018. С. 48–55.
- Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М., Сытина А. Н. Опыт регистрации грозовой активности на территории Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. Т. 2 (17). С. 130–137.

- Бурцев А. В., Фастий Г. П., Ярошевич В. В. Сопоставление результатов регистрации различных систем грозопеленгации в Кольском регионе // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 3–16. С. 48–52.
- Куликов А. Л., Ананьев В. В. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач // Вестник ИГЭУ. 2014. № 4. С. 21–25.
- Куликов А. Л., Лачугин В. Ф., Ананьев В. В., Вуколов В. Ю. [и др.]. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения // Электрические станции. 2015а. № 7. С. 45–53.
- Куликов А. Л., Лукичева И. А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16–21.
- Куликов А. Л., Мисриханов М. Ш., Петрухин А. А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кв методами активного зондирования. М. : Энергоатомиздат, 2009. 162 с.
- Куликов А. Л., Обалин М. Д. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015б. № 2. С. 70–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2015-2-70-75>.
- Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П. Атмосферное электричество и молниезащита в электроэнергетике. Мурманск : МГТУ, 2015. 187 с.
- Усачев А. Е., Юдицкий Д. М. Методика расчета грозоупорности воздушных линий электропередачи по параметрам опор и пролетов с учетом ветровой нагрузки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 70–76.
- Klebesadel R. W., Evans W. D., Fenimore E. E., Laros J. G. et al. Time-of-arrival location technique // Los Alamos Science. 1982. N 3. С. 10–23.
- Watt A. D. International series of monographs in electromagnetic waves. New York : Pergamon, 1967. 724 p.

## References

- Burtsev, A. V. 2018. Development of the database basis of high-voltage electric networks for creation of the system of their control. In coll. articles *Mathematical researches in natural sciences*, Apatity, pp. 48–55. (In Russ.)
- Burtsev, A. V., Nevretdinov, Yu. M., Sytina, A. N. 2014. Experience in registration of thunder activity in the territory of the Kola Peninsula. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2(17), pp. 130–137. (In Russ.)
- Burtsev, A. V., Fastiy, G. P., Yaroshevich, V. V. 2018. Comparison of registration results of the various lightning detection systems in the Kola region. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 9, pp. 48–52. (In Russ.)
- Kulikov, A. L., Ananiev, V. V. 2014. Adaptive travelling wave fault location in power transmission lines. *Vestnik IGEU*, 4, pp. 21–25. (In Russ.)
- Kulikov, A. L., Lachugin, V. F., Ananiev, V. V., Vukolov, V. Yu. et al. 2015а. Modeling of wave processes on power lines to improve the accuracy of a fault location. *Elektricheskie stantsii*, 7, pp. 45–53. (In Russ.)
- Kulikov, A. L., Lukicheva, I. A. 2016. Fault location in power transmission lines by instantaneous values of alarm oscillograms. *Vestnik IGEU*, 5, pp. 16–21. (In Russ.)
- Kulikov, A. L., Misrikanov, M. Sh., Petrukhin, A. A. 2009. Identification of damage to power lines of 6–35 kV using active sensing methods. Moscow. (In Russ.)
- Kulikov, A. L., Obalin, M. D. 2015б. Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, 2(538), pp. 70–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2015-2-70-75>. (In Russ.)
- Nevretdinov, Yu. M., Fastiy, G. P. 2015. Atmospheric electricity and lightning protection in the electric power industry. Murmansk. (In Russ.)
- Usachev, A. E., Yuditskii, D. M. 2014. Calculation methodology of lightning-proof overhead power lines by parameters of reliance and spans taking into account wind load. *Power engineering: research, equipment, technology*, 7–8, pp. 70–76. (In Russ.)
- Klebesadel, R. W., Evans, W. D., Fenimore, E. E., Laros, J. G. et al. 1982. Time-of-arrival location technique. *Los Alamos Science*, 3, pp. 10–23.
- Watt, A. D. 1967. International series of monographs in electromagnetic waves. New York.

## Сведения об авторе

**Бурцев Антон Владимирович** – мкр. Академгородок, 21А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [a.burtsev@tehnionord.ru](mailto:a.burtsev@tehnionord.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2055-5874>

**Anton V. Burtsev** – 21A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas FRC KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [a.burtsev@tehnionord.ru](mailto:a.burtsev@tehnionord.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2055-5874>