

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-110-116

УДК 621.316.

## ГРОЗОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЗАЩИТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

## LIGHTNING STORMS AND PROTECTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS AGAINST ATMOSPHERIC OVERVOLTAGE

Малахова Татьяна Федоровна,  
доцент, e-mail: t.malakhova2012@yandex.ru

Malakhova Tatyana F., Associate Professor

Захаренко Сергей Геннадьевич,

доцент, e-mail: zahar\_sg@mail.ru

Zakharenko Sergey G., Associate Professor

Захаров Сергей Александрович,

доцент, e-mail: seza1@mail.ru,

Zakharov Sergey A., Associate Professor

Кудряшов Дмитрий Семенович,

доцент, e-mail: kudryshov1969@gmail.com

Kudryashov Dmitry S., Associate Professor

Скребнева Евгения Владимировна,

ст. преподаватель, e-mail: evgeniyas77@rambler.ru

Skrebneva Evgenia V., Senior lecturer

Балаганский Андрей Олегович,

магистрант, e-mail: balaganskiyao@gmail.com

Balaganskiy Andrey O., undergraduate

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, ul. Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian  
Federation

**Аннотация.** Грозовые перенапряжения обладают самой большой кратностью, при этом являются самыми короткими по времени воздействия и наиболее тяжёлыми для электроустановок. Коммутационные перенапряжения, напротив имеют небольшую кратность, но могут существовать часами. Поэтому грозовые перенапряжения в системах электроснабжения (далее – СЭС) являются наиболее актуальными. В статье проведен анализ технологических нарушений по типу оборудования и причинам нарушений при атмосферных перенапряжениях. Рассмотрены влияния атмосферных перенапряжений на функционирование систем электроснабжения, природы источника грозовых перенапряжений, распространение волн в системах электроснабжения, защиты техническими средствами от атмосферных перенапряжений при прорыве молнии на токоведущие части. Приведена характеристика грозовых перенапряжений по сравнению с другими видами перенапряжений. Проведена оценка особенностей защиты, а также мероприятий по защите от грозовых перенапряжений. Рассмотрены вопросы снижения влияния грозовых перенапряжений на работу систем электроснабжения. Тема работы имеет большое практическое значение, так как защита от грозовых перенапряжений является одной из наиболее сложных технико-экономических задач, полностью решить которую, в настоящее время, не представляется возможным вследствие малоизученности теоретической части и несовершенстве доступных технологий.

**Abstract.** Lightning overvoltage has the largest multiplicity, while being the shortest in time and most severe for electrical installations. Commutation overvoltage, on the contrary, has a small multiplicity, but it can exist for hours. Therefore, lightning overvoltage in power supply systems (hereinafter - SES) is most relevant. The analysis of technological disturbances by type of equipment and by causes of disturbances during atmospheric overvoltage is given in the article. The article reviews the influence of atmospheric overvoltage on the functioning of power supply systems, the nature of the source of lightning overvoltage, the propagation of waves in power supply systems, the protection by technical means from atmospheric overvoltage during breakthrough of

*lightning to live parts. The characteristic of thunderstorm overvoltage in comparison with other types of overvoltage is given. The evaluation of protection features as well as measures to protect against lightning overvoltage has been carried out. The problems of reducing the influence of lightning overvoltage on the operation of power supply systems are considered. The theme of the work is of great practical importance, since protection against lightning overvoltage is one of the most difficult technical and economic problems, which is impossible to solve completely at the present time due to a poorly studied theoretical part and imperfection of available technologies.*

**Ключевые слова:** электроэнергетика, перенапряжения, гроза, молния, защита оборудования.

**Keywords:** Electric power engineering, overvoltage, thunderstorm, lightning, equipment protection.

В процессе эксплуатации изоляция электрооборудования находится под воздействием как рабочего напряжения, так и возможных внешних и внутренних перенапряжений, являющихся импульсом или волной напряжения, накладывающейся на номинальное напряжение сети [1].

Перенапряжения имеют различную природу. Выделяют такие виды перенапряжений как грозовые, резонансные, феррорезонансные, коммутационные [2].

Перенапряжения имеют такие характеристики, как:

- максимальное амплитудное значение напряжения;
- длительность воздействия;
- форма кривой импульсов перенапряжения;
- широта охвата элементов сети (расстояние воздействия волны перенапряжения).

Грозовые перенапряжения обладают самой большой кратностью, при этом являются самыми короткими по времени воздействия и наиболее тяжёлыми для электроустановок. Коммутационные перенапряжения, напротив, имеют небольшую кратность, но могут существовать часами.

В результате атмосферных воздействий, согласно статистики, повреждается большое количество оборудования. Удар молнии несёт угрозу для электроустановок всех классов напряжения, вне зависимости от их устройства. К примеру, при прямом ударе молнии в провод ВЛ 110 кВ почти всегда происходит перекрытие изоляции. Для линий 500-1150 кВ опасными являются 30-40% аналогичных ситуаций. Даже высокая импульсная прочность линейной изоляции ВЛ 500-1150 кВ не может обеспечить грозоупорность линии при прямом ударе молнии в провод [7, 8].

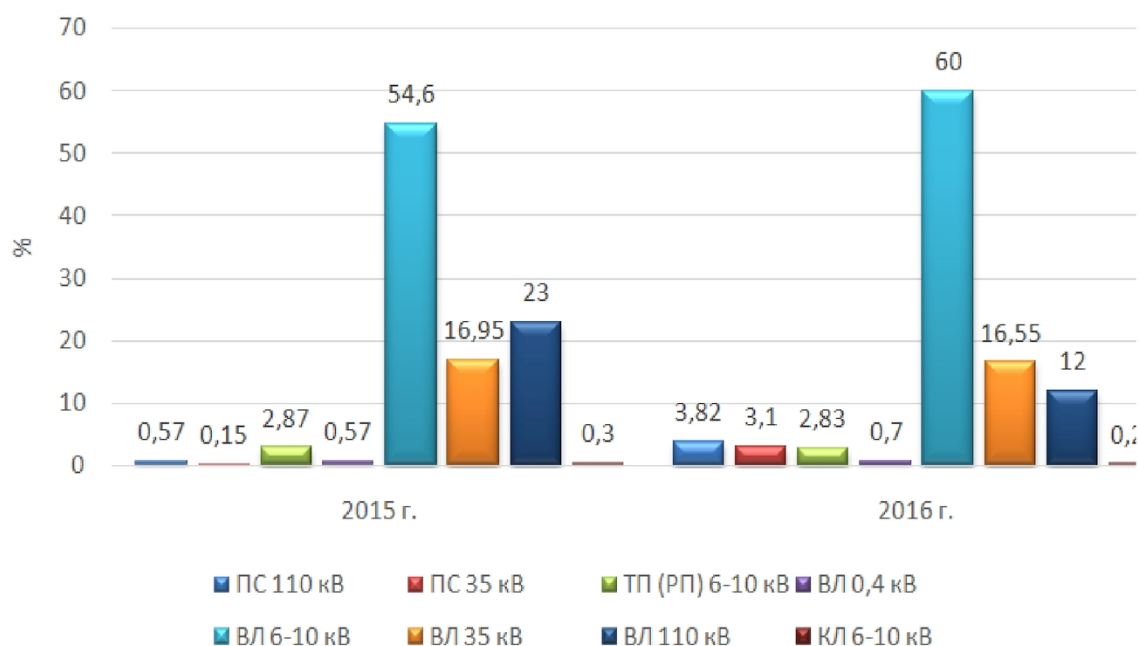


Рис. 1 Статистика ТН по типу оборудования

Fig.1. Statistics of technological disturbances (TD) by type of equipment, %

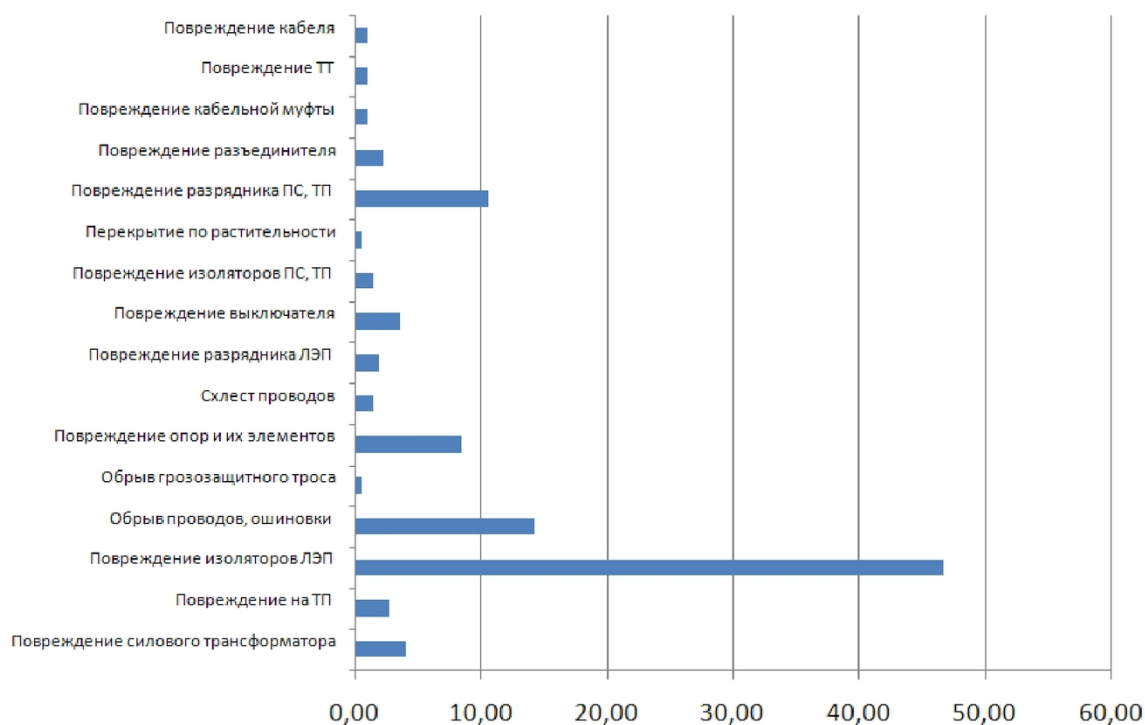


Рис.2. Анализ причин ТН при атмосферных перенапряжениях, %  
Fig.2. Analysis of the causes of TD at atmospheric overvoltage, %

В настоящее время актуальность проблемы грозовых перенапряжений в системах электроснабжения (далее – СЭС) обусловлена ещё и повышением грозовой активности и, как следствие, увеличением количества технологических нарушений (далее ТН), вызванных влиянием атмосферных перенапряжений. К примеру, в сетях на территории Сибири количество ТН, по причине атмосферных перенапряжений, увеличилось в два раза за год по сравнению с аналогичным периодом. Причём статистика ТН различного оборудования (рис.1), относительно общего количества ТН за соответствующий год, также подверглась изменениям, хоть и в меньшей степени. Проведен анализ причин ТН при атмосферных перенапряжениях (рис 2).

Снизить влияние грозовых перенапряжений на работу систем электроснабжения можно лишь путём построения комплексной системы защиты [7].

С целью отыскания решения данной проблемы прежде всего необходимо познакомиться с природой источника грозовых перенапряжений [9].

Электрические разряды, в больших количествах накапливающиеся в облаках, вызывают грозовые разряды – молнии. Существует масса теорий, которые по-разному в деталях освещают электризацию облаков, но, на сегодняшний день, ещё не написана теория, которая бы давала исчерпывающее объяснение данному явлению. В настоящей статье кратко рассмотрим наиболее значимые, для понимания общей картины физического

явления, постулаты.

Электризация облаков – накопление, разделение положительных и отрицательных зарядов объясняется существованием восходящих потоков воздуха.

Одно из наиболее распространённых предположений исходит из того, что образование электрических зарядов в атмосфере происходит в постоянном электрическом поле земли. Планета Земля имеет отрицательный заряд, при этом среднее значение напряжённости вблизи поверхности – 100 В/м. Данная напряжённость обусловлена зарядами земли и практически не зависит от места, времени года и суток.

Воздух, окружающий поверхность планеты, имеет свободные заряды, движущиеся в направлении электрического поля Земли. При удалении от поверхности, плотность заряженных частиц увеличивается, как и проводимость воздуха. На высоте 80 км электрическое сопротивление воздуха падает в 3 миллиарда раз и достигает значения, сопоставимого с плотностью пресной воды.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод – Земля и её атмосфера представляют собой шарообразный конденсатор. Поверхность земли и слой атмосферы с высокой проводимостью – обкладки этого огромного конденсатора, а слой воздуха с большим сопротивлением служит изоляцией между «обкладками». Напряжение между поверхностью Земли и проводящими слоями атмосферы составляет ~ 200 кВ. Мощность «конденсатора» около 300 МВт. В этом электрическом поле образование грозовых облаков и происхождение

грозовых явлений осуществляется на высоте 1-8 км от поверхности планеты.

Грозы подразделяются по происхождению на тепловые и фронтальные.

Тепловые грозы вызываются нагревом нижних слоёв воздуха, поэтому воздушные массы расширяются и устремляются вверх. На высоте 2 км разогретый воздух встречается с областью отрицательных температур. Происходит конденсация влаги и образование грозовых облаков, состоящих из мельчайших электрически заряженных капель.

Фронтальные грозы образуются при условии соприкосновения фронтовыми частями двух различных по температуре потоков воздуха. При этом тёплый воздух устремляется вверх, образует завихрение и на высоте низких температур влага конденсируется, образуются грозовые облака.

В отличие от тепловых гроз, охватывающих малые территории и образующихся только в жару, фронтальные грозы образуются в любое время суток, занимают широкие площади и могут двигаться со скоростью более 150 км/ч.

Конденсат, под действием электрического поля «конденсатора», поляризуется. Нижняя часть капель имеет отрицательный заряд, верхняя – положительный. Мелкие капли восходящим потоком воздуха поднимаются вверх, крупные под действием силы тяжести падают в низ. В результате этого, движущиеся вверх капли отрицательно заряженной частью встречают отрицательные и положительные свободные заряды. Одноименные отрицательные отталкиваются, положительные притягиваются, капли становятся положительно заряженными. С крупными падающими каплями ситуация обратная и они получают отрицательный заряд.

Так происходит разделение зарядов в грозовом облаке: в верхнем слое скапливаются положительные заряды, в нижних – отрицательные. Поскольку средняя часть облака обладает некоторым сопротивлением, заряды какое-то время находятся на месте и не нейтрализуются. Далее электрическое поле-облако накладывается на поле поверхности земли изменяет его направление и становится положительно заряженным.

Заряды в грозовом облаке распределены неравномерно в точках критической напряженности, а при значениях 25-30 кВ/см, создаются условия образования молнии.

В месте облака с критической напряжённостью начинается процесс ударной ионизации, создаются лавины электронов, под действием фотоионизации и термоионизации возникают стримеры, которые преобразуются в лидеры. Разряд молнии, как длинная дуга, пробивает изолирующую воздушную массу между облаком и поверхностью земли. Образовавшаяся молния имеет длину от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Определённой проблемой становится то, что грозовой заряд обладает избирательностью и при приближении лидерного канала к земле на его электрическое поле влияют поля земли и различных искусственных сооружений.

При наличии под тучей какого-либо сооружения, к примеру, опоры ЛЭП, удар молнии придёт именно в неё, так как развивающийся лидер стремится достичь поверхности земли по пути с наименьшим электрическим сопротивлением.

Грозовой разряд чаще поражает те объекты, которые имеют лучшее заземление и меньшее сопротивление, даже если вблизи находятся более высокие сооружения.

Как уже отмечалось выше, грозовые перенапряжения возникают при разряде молнии в оборудование или рядом с ними в землю. Такой удар молнии приводит к волне напряжений, которая распространяется по линии и достигает оборудования электрических станций и подстанций. Самое слабое место воздушных линий электропередач (далее – ВЛЭП) – изоляторы. Грозы представляют опасность для электроустановок не только из-за перенапряжений, но и тем, что при прохождении тока молнии через какие-либо объекты оказываются серьёзные электромагнитные, термические и механические воздействия, что может привести к авариям и отказам оборудования [4].

Вследствие этого, требуется применение комплекса специальных защитных средств, предохраняющих электрооборудование от перенапряжений.

Одна из эффективных защитных мер – применение вентильных разрядников (РВ) или ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН). РВ и ОПН действуют на основе нелинейности вольт-амперной характеристики рабочих элементов: превышение определённого уровня напряжения сопровождается резким снижением сопротивления рабочей части электрического аппарата. При снижении напряжения до номинального, сопротивление восстанавливается.

Надо отметить, что РВ, хоть и имеют аналогичный принцип работы с ОПН, в настоящий момент являются устаревшим типом защиты. Принципиальное отличие состоит в том, что из-за низкой нелинейности вольт-амперной характеристики РВ, в их конструкции присутствуют и искровые промежутки. Большая нелинейность варисторов ОПН позволила полностью отказаться от искровых промежутков, что делает их более эффективными. Поэтому в дальнейшем речь будем вести только об ОПН.

Внутренняя изоляция дорогостоящего подстанционного оборудования более чувствительна к влиянию грозовых перенапряжений. Поэтому эффективность защиты от грозовых перенапряжений должна быть значительно выше применяемой для защиты ВЛ.

Грозовые перенапряжения на подстанционном



оборудовании возникают при ударах молнии в подстанцию и при поражениях ВЛ и приходе по ним на подстанциях (ПС) и распределительные устройства (РУ) волн грозовых перенапряжений.

Защита оборудования РУ от волн перенапряжений, вызванных атмосферными воздействиями, основана на следующих мероприятиях:

- построение системы защитных проходов ВЛЭП к РУ, на которых предприняты меры по снижению числа волн перенапряжения с опасными параметрами;

- установка ОПН с необходимыми характеристиками;

Основные случаи грозовых перенапряжений вызваны прямыми ударами молнии в элементы ВЛ (в фазные провода, опоры или грозотрос);

Требования к обустройству защитных проходов регламентированы п. 4.2.133 - 4.2.159 ПУЭ [3].

Предполагается, что при использовании всего комплекса защитных мер, число опасных грозовых волн, возникших на данном проходе, будет снижено до минимума, волны напряжения, возникающие дальше защитного прохода, не будут представлять опасности для электрооборудования РУ.

Для обустройства защитных проходов, согласно ПУЭ, может использоваться [3]:

- установка на подходах ВЛ, присоединённых к РУ, грозозащитных тросов, для снижения количества случаев попадания молнии в фазные провода;

- выбор оптимального положения тросов, для обеспечения минимальной вероятности прорыва молнии на фазные провода;

- уменьшение сопротивлений заземляющих устройств ближайших к РУ опор, в результате чего при ударе молнии в грозотрос или опору, уменьшается вероятность пробоя на фазные провода;

Места размещения ОПН в РУ определены ПУЭ [2]. В типовых схемах ОПН устанавливается после трансформатора напряжения, ближе к силовому трансформатору, как наиболее ответственному и дорогому оборудованию.

Другой вариант размещения ОПН, нашедший применение в мировой практике, предполагает установку на входе РУ дополнительных ОПН, что повышает защищённость всего оборудования от перенапряжений. В этом случае:

- всё оборудование находится после защитных аппаратов по ходу движения волны перенапряжения, что обеспечивает глубокое ограничение перенапряжений;

- существенно снижено расстояние каждой единицы оборудования до ОПН.

Также существует вариант каскадного принципа защиты оборудования. Реализация этого принципа предполагает установку ОПН у обмоток силовых трансформаторов и на каждой присоединённой воздушной линии. При этом установка

ОПН на сборные шины не требуется.

При использовании каскадной схемы, вероятность повреждения оборудования при атмосферных перенапряжениях гораздо ниже, чем при типовых.

Выбор ОПН, устанавливаемых на входе РУ, сводится к определению его наибольшего рабочего напряжения и удельной энергоёмкости с последующей проверкой прочих характеристик (остающихся напряжений и др.) выбранного типа ОПН конкретным условиям эксплуатации.

Характеристики ОПН по допустимой энергии и току важны, так как при установке на опорах возможны прямые удары молнии в ОПН, особенно, если линия не оснащена грозотросом. При этом возможен вариант выхода защитного аппарата из строя.

Снижение риска повреждения ОПН достигается:

- применением грозозащитных тросов;

- выбор ОПН с повышенными энергоёмкостью и допустимыми импульсными токами;

- увеличением числа ОПН, для рассеивания энергии несколькими аппаратами;

Грозоупорность воздушной линии (ВЛ) характеризуется числом грозовых отключений и рассчитывается для первого импульса, так как вероятность перекрытия изоляции при воздействии последующих импульсов тока удара молнии нигде не исчезают, однако повторные разряды отличаются более коротким фронтом, меньшей длительностью и амплитудой, при обычном времени действия защит и АПВ укладываются в бестоковую паузу одного отключения.

Вероятность прорыва молнии на провода зависит от высоты опоры, числа и расположения тросов относительно проводов ВЛ: углом защиты, высотой троса над проводом. Чем выше трос относительно проводов и меньше угол защиты и высота опоры, тем выше эффективность тросового молниеотвода.

В качестве основных средств грозозащиты ВЛ используются:

- тросовые молниеотводы;

- повышение импульсной прочности изоляции;

- снижение сопротивления заземляющих устройств опор;

- использование защитных аппаратов (ОПН).

Подводя итог необходимо сказать, что вопрос обеспечения надёжности электро-снабжения не теряет своей актуальности. При этом большую долю технологических нарушений занимают грозовые отключения [11, 12]. Защита от грозовых перенапряжений является одной из наиболее сложных технико-экономических задач, полностью решить которую, в настоящее время, не представляется возможным вследствие малоизученности теоретической части и несовершенство доступных технологий [13]. Для минимизации

влияния атмосферных явлений на работу электрооборудования и соответствующего повышения надёжности электроснабжения необходима комплексная программа внедрения защит в сетях всех классов напряжения, что, в свою очередь, ведёт к

большим капитальным расходам и является сложной технико-экономической задачей, не имеющей на настоящее время решения, обеспечивающего полную защиту оборудования от грозových перенапряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. - М.: 2013-383 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. - М.: Энергосервис, 2003.
3. Правила устройства электроустановок; 7 изд. - М.: НТЦПБ, 2012. - 584 с;
4. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин - Изд. 2-е. - Ростов н/Д: Феникс, 2008. - 715 с.
5. Конюхова Е.А., Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева - М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. - 92 с.
6. Рожнова Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожнова, В.С. Козулин - М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Разгильдеев, Г.И. Эксплуатация систем электроснабжения (Эксплуатация электрооборудования): учеб.пособие / Кузбас. гос. техн. ун-т. - Кемерово, 2009.-196 с.
8. Яшура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник - М.: Изд-во НЦЭНАС, 2005.- 504 с.
9. Разгильдеев Г.И. Надёжность электромеханических систем электрооборудования: учеб.пособие. - 4-е изд., перераб. и доп. - Кемерово. 2008. - 157.
10. Бударгин О.М. Соответствовать требованиям времени - обеспечить лидерство // Электроэнергия. Передача и распределение, 2016. - №1, С 2-5.
11. Фаустов А.В. Мощный производственный потенциал для обеспечения надёжного электроснабжения потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение», 2016. - №1, С 6-9.
12. Кудрин Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие / Б.И. Кудрин, Б. В. Жилин, Ю.В. Матюнина. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 412 с.
13. Анализ аварийности в электросетевом комплексе / С.Г. Захаренко, Т.Ф. Малахова, С.А. Захаров, В.А. Бродт, Р.С. Вершинин // Вестник КузГТУ. - 2016. - №4. - С. 95-98.
14. Электробезопасность в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Электроснабжение» / Т. Ф. Малахова, С. Г. Захаренко, С. А. Захаров. - ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», каф. электроснабжения горн. и пром. предприятий. - Кемерово, 2016. - 129 с.

## REFERENCES

1. The rules of technical operation of consumer electrical installations. - M.: 2013- p.383.
2. The rules of technical operation of power plants and grids of the Russian Federation-. - M .: Energoservice 2003.
3. The rules of electrical installations arrangement; 7th ed. - M .: NTTSPB, 2012. - p.584.
4. Gerasimenko A.A. Transmission and distribution of electric energy / A.A. Gerasimenko, V.T Fedin - Ed. 2nd. - Rostov n / D: Phoenix, 2008. - p.715.
5. Konyukhov E.A, Reliability of power supply to industrial enterprises / E.A Konyukhov, E.A Kireev - M: NTF "Energoprogress", 2001. - p.92.
6. Rozhnova L.D. Electrical stations and substations / L.D. Rozhnova, V.S. Kozulin - M .: Energoatomisdat 1987.
7. Razgildeev, G.I. Operation of power supply systems (electrical operation): Textbooks / Kuzbass. state. tehn. Univ. - Kemerovo, 2009.- p.196.
8. Yaschura A.I. The system of maintenance and technical service of energy equipment. Directory - M .: Izd NTSENAS, 2005.- p.504.
9. Razgildeev G.I. Reliability of electromechanical systems of electrical equipment: Textbooks. - 4th ed., Revised. and ext. - Kemerovo. 2008 - p.157.
10. Budargin O.M. To comply with the requirements of the time is to ensure the leadership // Electricity. Transmission & Distribution, 2016.- №1, pp. 2-5.
11. Faustov A.V. Powerful production capacity to ensure reliable power supply to consumers // Electricity. Transmission and distribution», 2016.- №1, pp.6-9.

12. Kudrin B.I. Power supply to consumers and modes: Textbook / B.I. Kudrin, B.V. Zhilin, Y. Matyunina. - М.: MEI Publishing House, 2013. – p.412.

13. Analysis of accidents in the power grid / S.G. Zakharenko, T.F. Malakhov, S.A. Zakharov, V.A. Brodt, R.S. Vershinin // Vestnik of KuzGTU. - 2016. - № 4. - pp. 95-98.

14. Electrical safety in the electric power industry [Electronic resource]: a textbook for students in the field of training 13.03.02 "Electric power engineering and electrical engineering", educational program "Power supply" / T.F. Malakhova, S.G. Zakharenko, S.A. Zakharov. - FGBOU VO "T.F. Gorbachev Kuzbass State Tech. Un-ty", Dept. of power supply to mining and industrial operations. - Kemerovo, 2016. – p.129.

*Поступило в редакцию 13 июня 2017*  
*Received 13 June 2017*