ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

АВТОР:

А.А. КУЧЕРЯВЕНКОВ
ООО МНПП «АНТРАКС»

Воздушная линия электропередачи напряжением до 1000 В является самым распространенным и наиболее уязвимым элементом распределительной энергетической системы, особенно в сельской местности, в малых городах и пригородных зонах мегаполисов. Статистика аварий в энергосистемах свидетельствует, что причина 75–80% аварийных отключений линий электропередач весной и летом — это грозы.

Ключевые слова: геоинформационная система; воздушная линия электропередачи; повреждение; мониторы электрической сети.

Воздушные линии электропередачи, являясь хорошей антенной, передают возникающие при грозе возмущения напряжения вдоль всей линии ВЛ

ВВЕДЕНИЕ

Использование систем геопозиционирования в текущий момент стремительно растет в большинстве стран, поскольку понимание месторасположения и размещения объектов — это жизненно важный компонент эффективного принятия решений. По мнению экспертов из комиссии ООН по управлению глобальной геопространственной информацией, географическая информация станет повсеместной практически в любом аспекте государственного управления и жизни граждан [8]. Эти данные не только помогут в немедленном реагировании, но и поспособствуют улучшению планирования и восстановления важнейших систем жизнеобеспечения, в том числе энергетической системы.

В настоящее время отмечается слабопредсказуемый характер погодных и климатических отклонений от спрогнозированных норм. В том числе нарастают интенсивность и неоднородное распределение грозовой активности, имеющей резко выраженный региональный характер [6]. Для предотвращения негативного воздействия и минимизации ущерба необходимо создание географической информационной системы (ГИС) мониторинга грозовой активности в реальном времени. ГИС содержит данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении, форме и свойствах, представленные в координатно-временной системе [3, с. 4]. С помощью ГИС можно осуществить пространственную привязку электросетевого комплекса к географической карте и увязать его с системами регистрации грозовой активности.

Цель создания ГИС — повышение точности определения величины и координат грозового заряда, информации о текущей интенсивности и пространственном распространении грозового фронта, а также сбор статистических данных о характеристиках грозовых районов. ГИС не требует создания дополнительных пунктов измерения, а базируется на установленных в комплексе распределительных сетей 6–110 кВ устройствах определения поврежденного участка воздушной линии (ВЛ). Одновременно с регистрацией скачков напряженности электрического поля несколькими пространственно-разнесенными топографическими указателями поврежденного участка ВЛ (индикаторами короткого замыкания) регистрируется отношение амплитуд скачков горизонтальных составляющих вектора напряженности магнитного поля, создаваемого током молнии. Дополняют данные измерения установленных на подстанциях (ПС) устройств определения поврежденного фидера (ОПФ), таких как мониторы электрической сети и терминалы ОПФ. После передачи данных в диспетчерский центр они обрабатываются, отображаются на карте в режиме реального времени, составляется и решается система уравнений, связывающих скачки электрического и магнитного полей с величиной и координатами заряда. По каждому из молниевых разрядов формируется сообщение, содержащее следующие данные: время возникновения, географические координаты, погрешность расчета координат молниевых разрядов, напряженность электрической

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМУ КОМОРСАН С ОТОБРАЖЕНИЕМ НА СПУТНИКОВОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ КАРТЕ

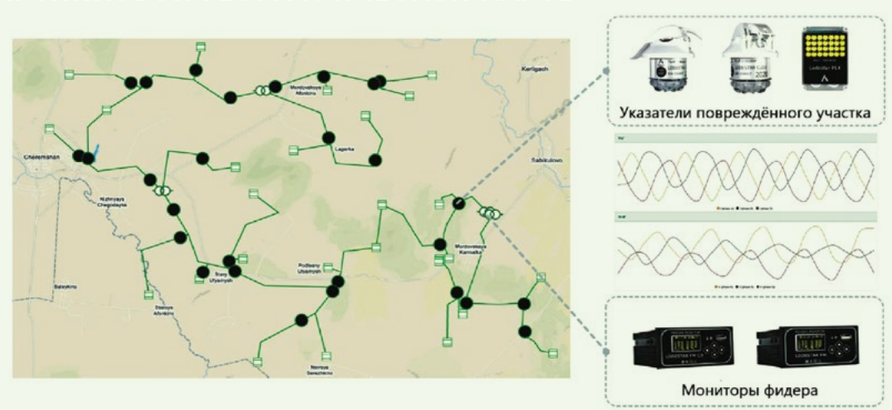


Рис. 1

МОДЕЛЬ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В СИСТЕМЕ КОМОРСАН С ОТОБРАЖЕНИЕМ НА СПУТНИКОВОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ КАРТЕ

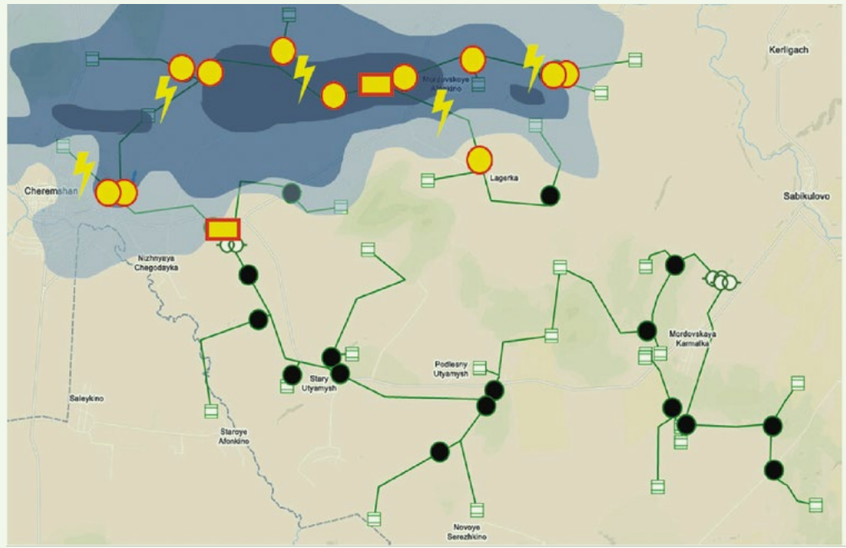


Рис. 2

составляющей поля (сила и направление тока, форма волны).

ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ — УДОБНАЯ БАЗА ДЛЯ СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Потребители электроэнергии есть практически повсюду. В электросетевых комплексах наибольшей протяженностью обладают электрические сети напряжением 6–110 кВ, доля которых превышает 75%. В России общая протяженность сетей 6–110 кВ составляет более 1,5 млн км, и более полумиллиона понижающих ПС, установленных в этих сетях, обеспечивают питанием нагрузки на напряжении 0,4 кВ [7]. ВЛ среднего класса напряжения построены по радиальному принципу, представляют собой разветвленную сеть, очень плотную в населенных районах. Именно в населенных районах сбор информации о грозовой активности, поведении молний и распространении электрических импульсов особенно актуален.

ВЛ электропередачи являются хорошей антенной, передающей грозовые импульсы вдоль линии благодаря возникновению возмущений тока и напряжения. Поэтому ВЛ служат удобной базой для создания информационной системы знаний о грозовой активности. Собрав данные о токе, напряжении, частоте и длительности импульсов, форме и амплитуде волны в ВЛ, можно получить актуальные знания о грозовой активности.

Преимущества использования комплекса сетей 6–110 кВ как базы для создания ГИС заключаются в следующем:

1) простота использования — не требуется отдельных конструкций для размещения регистрационных приборов;

2) возможность проведения грозомониторинга на основе имеющегося оборудования для нужд электроэнергетики в реальном времени без дополнительных затрат;

3) легкая возможность установки дополнительного серверного оборудования ГИС в комплексе оперативно-диспетчерского управления ПС;

4) наличие постоянного мониторинга ситуации в энергосистеме, необходимого для оперативного реагирования на показания ГИС грозовой активности.

УКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА ВЛ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ — ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Указатели поврежденного участка ВЛ и мониторы электрической сети предназначены для определения поврежденного фидера и поврежденного участка ВЛ электропередачи и сигнализации о произошедшей аварийной ситуации. Они представляют собой стационарные устройства мониторинга, устанавливаемые непосредственно на провод или опору линии электропередачи либо в ячейку комплектно-распределительного устройства (КРУ). В основе их функционирования лежат топографические методы, такие как индукционные (индикация параметров магнитного поля токов в проводах ВЛ), акустические (улавливание на трассе акустических (механических) колебаний), потенциальные (фиксация вдоль трассы электрических потенциалов) и электромеханические [2].

Первые указатели поврежденного участка были разработаны компанией Horstmann в 1946 г., а в России топографические методы определения места повреждения были реализованы в указателях опор с поврежденной изоляцией типа УПИ-1 в 1970-х гг. Современные указатели поврежденного участка дают возможность измерения параметров аварийных токов в самом широком диапазоне: от 0,5 до 10 000 А. В указателях типа ИКЗ-В34 реализована функция синхронного измерения токов, в том числе их высокочастотной составляющей. Использующийся приемник точного времени GPS/ГЛОНАС позволяет реализовать алгоритм определения расстояния до места повреждения. ИКЗ обладают способностью оцифровки поступающих измерений с большой частотой.

Устанавливаемые в ячейку КРУ мониторы электрической сети типа «А-Сигнал» также регистрируют дату и время аварийного события, направление повреждения, поврежденные фазы, основные параметры, максимальные и минимальные значения в процессе фиксации события. Анализируя портрет волновой функции, они осциллографируют с частотой дискретизации 1 МГц и фиксируют направление потокораспределения. При применении устройств определения места повреждения для построения ГИС грозовой активности необходима настройка на ожидаемые параметры индуктированного заряда: диапазон скачков тока и напряжения, форму и амплитуду волны, частоту возникновения перенапряжения.

Известно, что основной характеристикой грозовых импульсов является общая продолжительность удара от 0,15 до 1100 мс [4, Приложение А, с. 41]. ИКЗ-В34 могут измерять параметры первого высокочастотного фронта с частотой 100 кГц или 10 мкс. Также на входе индикаторов установлены высокочастотные фильтры, которые интегрируют энергию импульса и поэтому могут определять импульсы высокой энергии короче 10 мкс. Применение устройств определения места повреждения для построения ГИС грозовой активности не требует дополнительных финансовых вложений, поскольку основано на уже установленном и функционирующем комплексе приборов.

СБОР, АНАЛИЗ И ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КОМОРСАН

Указатели поврежденного участка ИКЗ-34 и мониторы электрической

УСЛОВНАЯ СХЕМА ФИКСАЦИИ ПРИБОРАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ

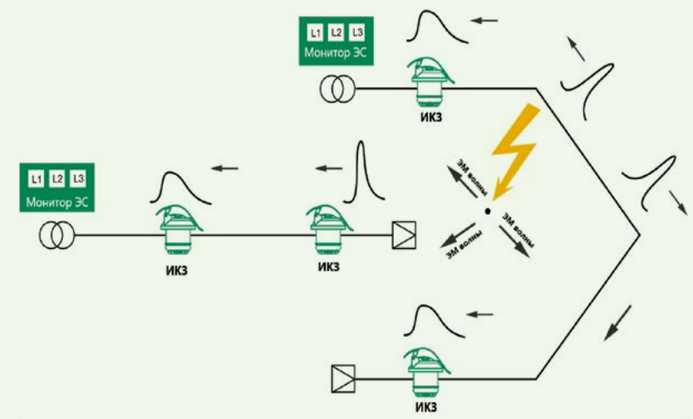


Рис. 3

КРИВАЯ ХВОСТА ТОКА ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

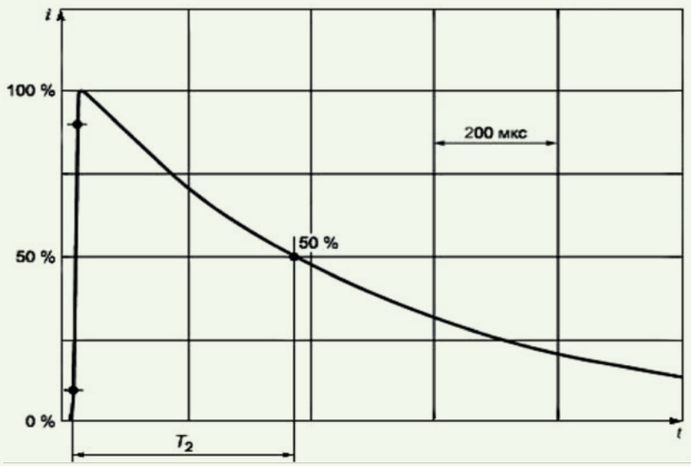


Рис. 4

сети «А-Сигнал» передают информацию по радиоканалу, с помощью канала ретрансляции данных или посредством GSM-канала в SCADA-систему или систему мониторинга линий электропередачи КОМОРСАН. Комплексная система диагностики КОМОРСАН включает в себя различные программные приложения, максимально упрощающие работу диспетчера, в том числе геоинформационное приложение КОМОРСАН веб-клиент, наглядно визуализирующее на карте состояние линий электропередачи и показания приборов, с точным отображением их координат. Графические данные хранятся в виде отдельных тематических слоев, а качественные и количественные характеристики составляющих их объектов — в виде баз данных. Технический результат заключается в формировании многоуровневой информационной сети. Передача информации в систему КОМОРСАН происходит в реальном времени (рис. 1).

Функциями ГИС, построенной в комплексной системе мониторинга КОМОРСАН, являются:

1) ввод и редактирование данных об объектах электросетевого комплекса;

2) поддержка моделей пространственных данных: Яндекс.карты, GoogleStreetMap и др.;

3) хранение информации об объектах, событиях, их качественных и количественных характеристиках, GPS-координатах;

4) отображение и совмещение картографических слоев — слой геоинформационной карты, слой объектов (ВЛ, ПС, потребители, установленные устройства), слой информации о свойствах объекта в реальном времени (измеренные устройствами показатели, включая параметры грозовых импульсов);

5) подготовка типовых картографических продуктов в соответствии с заявками потребителя;

6) редактирование расположения линий электропередачи и приборов для измерения данных о грозовой активности (ИКЗ);

7) вывод результатов в разных формах — визуальное отображение, подсветка на карте, расшифровка данных, сводные таблицы и др.

Основные преимущества системы КОМОРСАН для реализации ГИС грозовой активности таковы:

— отличается легкостью приспособления и возможностями расширения, поскольку является открытой системой;

— система разработана и производится в России, полностью адаптирована для использования в нашей стране;

— может быть оперативно использована при развертывании сети передачи данных;

— позволяет осуществлять дистанционный контроль ситуации на линиях электропередачи, включающий в себя функции оповещения об изменении состояния приборов посредством уведомления через sms и e-mail;

— дает возможность работать с устройствами в режиме реального времени, в том числе вести непрерывный анализ поступающей информации;

— позволяет использовать облачные технологии и специальные алгоритмы обработки данных.

Анализ информации с нескольких приборов, расположенных на одной линии, в режиме реального времени дает возможность оценить про-

движение грозового фронта, частоту возникновения грозовых импульсов, диапазон скачков тока и напряжения (рис. 2). Но для расширения информационных возможностей, прежде всего точного определения GPS-координат грозового разряда и особенностей его протекания, необходима дополнительная алгоритмическая обработка данных, реализуемая в отдельных приложениях системы КОМОРСАН по запросу.

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ О ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В ГИС МОНИТОРИНГА КОМОРСАН

Для повышения точности и эффективности расчетов ГИС грозовой активности необходимо выполнить оценку токов растекания в точке установки указателя поврежденного участка (рис. 3).

В случае прямого удара молнии в ВЛ непосредственный эффект возникает от тока молнии, который вызывает перенапряжение на импедансе заземления. Эффективное значение импеданса для тока разряда молнии составляет несколько тысяч Ом. В случае удара молнии в непосредственной близости от ВЛ эффект перенапряжения вызывает наличие замкнутых контуров в цепях или резистивных связях, возникающих из-за импульсов тока. В случае удаленного удара молнии скачки перенапряжений ограничиваются наведенными (индуцированными) напряжениями [5, с. 25–27]. Реакция электрической системы при ударе молнии является важным аспектом при оценке величины и точных координат молниевого заряда.

Разряд молнии состоит из нескольких отдельных импульсов. Рас-

КРИВАЯ ХВОСТА ТОКА ПЕРВОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ [4, ПРИЛОЖЕНИЕ В, С. 53–54]

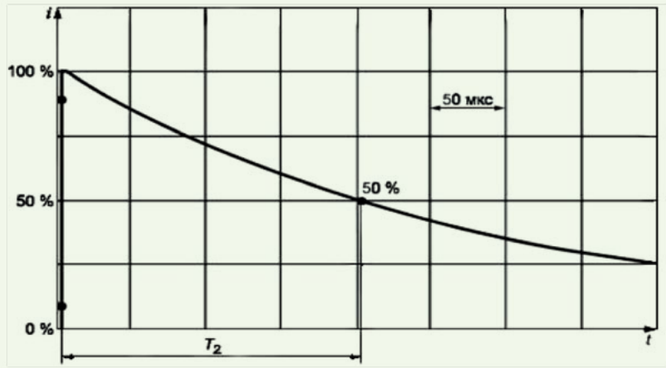


Рис. 5

смотрим характеристики типичного грозового импульса с точки зрения протекания тока во времени с помощью рис. 4 и 5.

Зная аналитические кривые зависимости тока от времени, мы получаем плотность амплитуды тока молнии. Указатели поврежденного участка типа ИКЗ-В34 и мониторы электрической сети типа «А-Сигнал», определяющие импульсы короче 10 мкс за счет установленных высокочастотных фильтров, фиксируют широкий спектр данных о грозовом процессе: скачки электрического и магнитного полей; отношение амплитуд скачков горизонтальных составляющих вектора напряженности магнитного поля, создаваемого током молнии; плотность амплитуды тока молнии. Видя данные о возмущениях полей в каждом приборе, установленном на линии, и зная координаты приборов, мы можем решить обратную задачу, чтобы определить точные GPS-координаты и параметры грозового импульса.

Для корректной привязки грозового импульса к географической точке необходимо построить математическую модель, составить и решить систему уравнений, связывающих зафиксированные несколькими приборами скачки электрического и магнитного полей с координатами заряда. Прежде всего надо учесть разницу распространения электрических импульсов по воздуху и проводу ВЛ электропередачи. По воздуху грозовой импульс распространяется со скоростью, близкой к скорости света, но быстро затухает. Распространяясь по ВЛ электропередачи, грозовой импульс существенно диспергирует. Распространяясь по ВЛ электропередачи, грозовой импульс существенно диспергирует. Система уравнений, описывающая распространение грозового импульса по ВЛ, определяет значения тока (I) и напряжения (U) в начале и конце участка ВЛ [1,9.10]:

$$\dot{U}_1 = \cos(n\beta l)\dot{U}_2 + jz_c \sin(n\beta l)\dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_1 = \cos(n\beta l)\dot{I}_2 + j/z_c \cdot \sin(n\beta l)\dot{U}_2,$$

где β — коэффициент изменения фазы при промышленной частоте сети;
z_c — волновое сопротивление линии;
n — номер гармоники;
j — мнимая единица.

Волновое сопротивление z_c и коэффициент распространения волны γ (комплексная величина) определяются частотой тока ω

$$z_c = \sqrt{\frac{r_0 + \omega L_0}{g_0 + \omega C_0}}, \quad \gamma = \alpha + j\beta,$$

где r_0, g_0, L_0, C_0 — погонные параметры ВЛ (активные сопротивление и проводимость, индуктивность и емкость); α — коэффициент затухания волны в линии.

Для линий напряжением 6–110 кВ погонная активная проводимость g_0 пренебрежимо мала. При частоте ω_c = 50 Гц погонное активное сопротивление r_0 одного порядка с индуктивным погонным сопротивлением $x_0 = \omega_c L_0$. Но если частота повышается в 10 раз и более, волновое сопротивление и коэффициент изменения фазы могут определяться так же, как и для линии без потерь. Для сопротивлений источника и нагрузки на высоких частотах (килогерц и более) также можно принять во внимание только их индуктивные составляющие [1, с. 58–59].

Зная конкретные параметры r_0, g_0, L_0, C_0 для каждой ВЛ и получив данные о токах и напряжениях грозового импульса от топографических устройств определения места повреждения, мы можем по этим формулам вычислить точку ВЛ, максимально приближенную к месту удара молнии, и параметры грозового импульса. При увеличении количества измеряющих и передающих приборов типа ИКЗ-В34 и «А-Сигнал» возможно улучшение алгоритмической обработки данных и повышение точности определения величины и координат грозового заряда. Мониторинг грозовой активности в режиме реального времени дает возможность получения информации о текущей интенсивности и пространственном распространении грозового фронта, необходимой для немедленного реагирования.

ВЫВОДЫ

Создание ГИС грозовой активности на базе комплекса распределительных сетей 6–110 кВ с использованием устройств определения места повреждения ВЛ позволяет получать данные о текущей интенсивности грозовой деятельности и заблаговременно предупреждать диспетчерские службы о начале и окончании грозы по трассе прохождения ЛЭП. Создание такой системы для энергокомпаний, оснащенных современными устройствами определения поврежденного участка, не требует дополнительных вложений.

Построение ГИС грозовой активности с использованием указателей поврежденного участка и системы мониторинга ситуации энергокомпаниями в режиме реального времени позволит:

— частично предотвратить возникновение аварий на объектах электроэнергетики и сбоев в электроснабжении потребителей, вовремя предприняв защитные меры немедленного реагирования;

— оперативно устранить повреждения линии электропередачи, зная точные GPS-координаты места повреждения линии;

— улучшить проектирование системы линий электропередачи на основе высокоточных статистических данных о грозовой активности за длительный период времени;

— усовершенствовать обеспечение безопасности жизнедеятельности людей во время грозовых явлений и в случае инициирования ими аварийных ситуаций;

— уменьшить экономический ущерб от грозовых явлений.

Использование обсуждаемой системы мониторинга грозовой активности в настоящее время подразумевает предварительное тестирование системы в сложных климатических условиях. На территории России применение системы в первую очередь целесообразно в регионах с высокой грозовой активностью, таких как Псковская, Смоленская, Свердловская области, Краснодарский край и Республика Алтай, а также в регионах с максимально развернутой сетью индикаторов поврежденного участка, в частности в Республике Татарстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллазянов Р.Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03/Абдуллазянов Рустем Эдвардович [Место защиты: Казан. техн. ун-т им. А.Н. Туполева]. Казань, 2013. С. 58–59.
2. Автоматизированные методы и средства определения мест повреждения линий электропередачи. Уч. пособие./О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный. Под общ. ред. О.Г. Гриба. Харьков: ХГАГХ, 2003. С. 82.
3. ГОСТ Р 52155–2003. Географические информационные системы федеральные, региональные, муниципальные. Общие технические требования.
4. ГОСТ Р МЭК 62305–1–2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы.
5. ГОСТ Р 55630–2013/IEC/TR 62066:2002. Перенапряжения импульсные и защита от перенапряжений в низковольтных системах переменного тока. Общие положения.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Учеб. пособие для ун-тов и гидрометеорол. вузов. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. С. 711.
7. Положение ОАО «Россети» о Единой технической политике в электросетевом комплексе. С. 23–25.
8. UN Committee of Experts on Global Geospatial Information Management. Future trends in geospatial information management: the five to ten year vision. P. 2.
9. Григорьева Е.Д. Электрические цепи с распределенными параметрами. Учебное пособие/МТУСИ. — М., 2010. — 27 с.
10. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов.. — М.: Высш. шк., 1990.

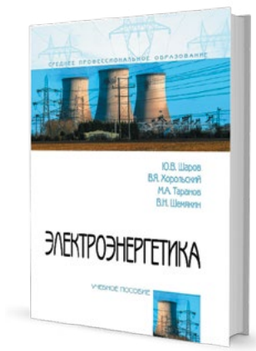
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

НЕМИРОВСКИЙ А.Е., СЕРГИЕВСКАЯ И.Ю., КРЕПЫШЕВА Л.Ю. 4-Е ИЗД. ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ, 2020. 174 С.

Рассмотрены основные вопросы, касающиеся электрических сетей, станций и подстанций. Дается характеристика воздушных и кабельных линий, электропроводок и токопроводов, силовых трансформаторов и автотрансформаторов, электрических аппаратов станций и подстанций напряжением до и выше 1 кВ; распределительных и трансформаторных подстанций.

Предложены схемы электрических соединений в системе электроснабжения, а также схемы электрических соединений станций и подстанций.

Для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и смежным направлениям, а также специалистов, занимающихся проектированием, строительством или обслуживанием электрических сетей, станций и подстанций.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШАРОВ Ю.В., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ТАРАНОВ М.А. , ШЕМЯКИН В.Н. М.: ФОРУМ, 2020. 384 С.

В учебном пособии в систематизированном виде рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с принципами построения, устройством и особенностями функционирования электроэнергетических систем. Учтены отечественные и зарубежные разработки в области создания новейших образцов электротехнических изделий.

Учтены такие темы, как релейная защита, системы электроснабжения, качество электрической энергии и надежность систем электроснабжения.

Цель учебного пособия заключается в получении студентами базовых знаний в вопросах производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии для дальнейшего углубленного изучения специальных дисциплин.

Предназначено для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по укрупненной группе специальностей 13.02.00 «Электро- и теплоэнергетика».

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

РУЧКИНА Г.Ф., ДЕМЧЕНКО М.В., БАРКОВ А.В. М.: ИНФРА-М, 2021. 202 С.

Монография посвящена разработке практических рекомендаций институционально-правового характера, направленных на повышение энергоэффективности энергетического сектора экономики в условиях цифровизации и экономических ограничений. Содержит научно-практические предложения, направленные на развитие деятельности хозяйствующих субъектов энергетического рынка России, инфраструктуры энергетической сферы, уделено влияние проблемам состояния российской энергетики, вопросам стратегического планирования и правового регулирования деятельности, направленной на энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Российской Федерации.

Предназначена для преподавателей, студентов и всех интересующихся вопросами энергоснабжения и энергоэффективности.