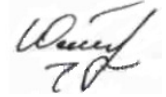


На правах рукописи



ЮДИЦКИЙ ДАНИЛ МИХАЙЛОВИЧ

**МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ГРОЗОУПОРНОСТИ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ПОДСТАНЦИЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электрические станции»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, **Усачев Александр Евгеньевич**, профессор кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Солуянов Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Открытого Акционерного Общества «Татэлектромонтаж», г. Казань.
Дмитриев Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Электрические системы и сети" ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования (ФГБОУ ВО) «Самарский государственный технический университет», г. Самара


Защита состоится 24 мая 2016 г. в 15:00ч. на заседании диссертационного совета Д 212.079.06 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Толстого, 15 (учебный корпус №3, ауд. 216)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» <http://www.kai.ru/science/dissert/index.phtml>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бердников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Особенностью электроснабжения современного промышленного комплекса заключается в том, что большое число предприятий имеют сложный характер технологического процесса, зависящий от непрерывного электроснабжения, отвечающий всем нормам и требованиям ГОСТ по качеству электроэнергии.

Себестоимость продукции и сроки окупаемости производственного комплекса тесно связаны с надёжностью их электроснабжения. Удары молний в воздушные линии электропередачи (далее ВЛ) приводят к аварийным отключениям ВЛ и перерывам электроснабжения, что приводит к выходу из строя технологического оборудования и, как следствие, экономическому ущербу многих производств. В целях повышения надёжной работы потребителей электроэнергии при нормальном и послеаварийном режимах необходимо:

- свести к минимуму число и продолжительность перерывов их электроснабжения, связанных, в частности, с ударами молний в ВЛ;

- обеспечить нормы ГОСТ по качеству электроэнергии для создания устойчивой работы ответственных технологических аппаратов при нарушениях режима электроснабжения.

Одним из способов повышения такой внешней составляющей надёжности является снижение ущерба от грозовых отключений ВЛ, т.е. повышение грозоупорности линий электропередачи. Основным показателем, характеризующим грозоупорность ВЛ, является число ее грозовых отключений, отнесенное к 100 км длины линии и 100 грозовым часам.

Во всем мире ведутся исследования в области модернизации методов защиты ВЛ от грозовых отключений и постоянно совершенствуются методики расчета молниезащиты ВЛ.

В РД 153-34.3-35.125-99 «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений» (далее РД) предлагается оценивать удельное число грозовых отключений, учитывая лишь усредненные показатели ВЛ, такие как сопротивление заземления опор, тип опор, а также суммарная длина линии и т.д. Вследствие неоднородности условий прокладки воздушных линий электропередачи наиболее точным был бы расчет, проводимый с учетом индивидуальных особенностей каждого участка на протяжении всей протяженности ВЛ.

Таким образом, задача по совершенствованию существующих методик оценки и расчета показателей грозоупорности воздушных линий электропередачи, с целью определения оптимальной последовательности проведения мероприятий по повышению надёжности снабжения потребителей электроэнергией и качества электроэнергии является **актуальной**.

Объект исследования – воздушные линии электропередачи напряжением 110-220 кВ и оборудование подстанций.

Предмет исследования – устойчивость воздушных линий электропередачи и оборудования подстанций к воздействию грозových перенапряжений.

Целью диссертационного исследования является снижение числа грозových отключений воздушных линий электропередачи и повреждений оборудования ПС за счет учета реальных конструктивных параметров воздушных линий электропередачи.

Научная задача исследования состоит в разработке методики и алгоритмов расчета показателей грозоупорности высоковольтных электротехнических комплексов передачи и распределения электроэнергии.

Для достижения цели диссертационного исследования и решения научной задачи диссертации необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методик контроля грозоупорности ВЛ и определить пути их совершенствования;
- разработать методику оценки грозоупорности ВЛ на основе суммирования грозоупорностей отдельных пролётов ВЛ, которые учитывают фактические характеристики каждой опоры и пролёта; создать алгоритм расчёта и набор программ; предложить принцип и последовательность мероприятий по повышению грозоупорности.
- провести оценку влияния ветровой нагрузки на грозоупорность ВЛ;
- проверить в лабораторных условиях обоснованность учёта двух путей обратного перекрытия с опоры на провод высокого напряжения в методике оценки грозоупорности ВЛ: разработать и создать экспериментальную установку; провести экспериментальные исследования; оценить влияние такого учета на численные оценки грозоупорности и его влияние на мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ;
- провести анализ существующих методик оценки вероятности повреждения оборудования ПС от набегающих волн и их обоснованность.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- модифицированная методика оценки показателей грозоупорности ВЛ основывается на суммировании числа грозových отключений каждого пролёта, что позволяет снизить погрешности расчёта заменой обобщённых параметров ВЛ на конкретные характеристики рассматриваемой линии электропередачи.
- на основании проведенных расчетов по электрогеометрическим и вероятностным методикам установлено, что доля ударов молний в опоры на ВЛ без тросовой защиты отличается от 1/2 и зависит от высоты опоры, стрелы провеса провода и длины пролёта, а на линиях электропередачи существует такая длина пролёта ($L_{кр}$), меньше которой установка молниезащитного троса увеличивает число аварийных грозových отключений;

– установлено, что для ВЛ 220 кВ ветер, направленный перпендикулярно оси ВЛ, со скоростями до 30 м/с практически не снижает грозоупорность;

– экспериментально в лабораторных условиях установлено, что общая вероятность пробоя при наличии двух возможных путей превышает вероятность пробоя по кратчайшему пути и предложена формула определения общей вероятности пробоя. На основании расчётов показано, что опасные для изоляции оборудования подстанций волны грозových перенапряжений с фронтом близким к вертикальному возникают при ударах молнии в опору или трос при любых искровых перекрытиях с опор или молниезащитного троса на фазный провод. Удары молнии в фазный провод на ВЛ с импульсным заземлением опор > 5 Ом не приводят к возникновению волн грозových перенапряжений с крутым задним фронтом (срезом). Молниезащитный трос в зоне защищенного подхода к ПС повышает вероятность возникновения волн с крутым передним фронтом, опасным для изоляции трансформаторов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в развитии теории молниезащиты электротехнических комплексов и систем:

– модифицирована существующая методика, разработаны алгоритм расчёта и комплект программ оценки грозоупорности ВЛ на основе суммирования показателя грозоупорности каждого пролёта и учёта фактических характеристик, позволяющая снизить погрешность расчётов по усреднённым параметрам ВЛ и повысить эффективность мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ;

– экспериментально в лабораторных условиях показано, что наличие двух возможных путей пробоя воздушных промежутков повышает общую вероятность пробоя и получена формула общей вероятности пробоя.

– показано, что ветер со скоростями до 30 м/с, направленный перпендикулярно оси пролёта ВЛ, снижает грозоупорность не более чем на 5% и может не учитываться;

– на основании расчётов показывается, что волны грозových перенапряжений с передним фронтом длительностью < 40 нс возникают при **любых** искровых разрядах с опор или молниезащитного троса на фазный провод (обратных перекрытиях). Молниезащитный трос в зоне защищенного подхода к ПС, повышая грозоупорность ВЛ, увеличивает число волн перенапряжения с крутым передним фронтом, опасных для оборудования ПС.

Практическая значимость полученных результатов заключается в практическом применении новой концепции грозоупорности ПС и использовании усовершенствованной методики контроля грозоупорности ВЛ, что позволяет:

– выявить и локализовать наиболее уязвимые участки ВЛ, снижающие общий показатель грозоупорности;

– определить анкерные пролёты ВЛ, где молниезащитный трос снижает показатели грозоупорности;

– определить наиболее эффективную по затратам очередность проведения мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ, что позволит повысить надежность электроснабжения за счёт снижения числа аварийных отключений и сокращения времени вынужденного ремонта ВЛ;

– повысить эффективность мероприятий по оборудованию защищённых подходов к ПС для уменьшения аварийности оборудования от волн грозовых перенапряжений, набегающих с линий электропередачи.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций определяется корректным применением методики молниезащиты, основанной на обобщении результатов экспериментальных данных поражаемости ударами молний ВЛ и статистики успешного восстановления работоспособности ВЛ средствами автоматического повторного включения (АПВ) линий различного класса напряжений, использованием современных теоретических и экспериментальных методов исследования, применением новых программных продуктов, сопоставимостью результатов с данными, полученными другими методами. Достоверность полученных результатов обеспечена повторяемостью измерений и их соответствие данным, опубликованным в научной литературе другими исследователями.

Личный вклад автора диссертации. Основные результаты работы получены лично соискателем. Автор принимал непосредственное участие в разработке и составлении программ, создании экспериментальной установки и проведении экспериментов и расчётов, обсуждении и анализе результатов, написании статей и выступлении на конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- VII Открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация в электроэнергетике: Проблемы и перспективы», г. Казань, 2012г;
- XVI аспирантско – магистерском научном семинаре, г. Казань, 2012 г.;
- IX международной научно-практической конференции «Ключевые проблемы современной науки– 2013», г. София, 2013г.;
- X международной научно-практической конференции «Современные научные достижения – 2014», г. Прага, 2014г.;
- X международной научно-практической конференции «Научная мысль информационного века – 2014», Болгария, 2014г.;
- X Международной молодежная научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 2014г.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертация соответствует специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. Представленные в ней результаты отвечают следующим пунктам паспорта специальности:

1. п.2 Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

2. п.3 Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Публикации по теме диссертации. По данному направлению исследования опубликовано 11 печатных работ, из них 4 статьи в журналах перечня ВАК и получено одно свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста иллюстрирована 48 рисунками и 12 таблицами. Список цитированной литературы состоит из 120 ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, ставятся цели и задачи работы, приводится научная новизна и практическая ценность работы, данные об апробации работы, приводятся положения, выносимые на защиту и достоверность полученных результатов, личный вклад автора.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. Она посвящена рассмотрению существующих методик защит линий электропередач от грозовых перенапряжений по стандартам МЭК и ГОСТ РФ и связи грозоупорности ВЛ с надёжностью электроснабжения. Рассмотрена природа возникновения молний. Обосновывается актуальность целей диссертации и задачи исследования.

Во второй главе диссертации рассматриваются методы расчёта грозоупорности ВЛ (потока отказов из-за грозовой активности атмосферы). Предлагается методика расчёта грозоупорности ВЛ, которая основана на учете индивидуальных характеристик каждого пролёта: высоты и типа опор, длины подвесных гирлянд изоляторов, стрелы провеса фазного провода и грозозащитного троса, типа и габарита траверс, сопротивления заземления опор, влияния ветровой нагрузки на провода ВЛ в период грозового сезона. Общая грозоупорность ВЛ рассчитывается как сумма грозоупорностей отдельных пролётов. В качестве иллюстрации предлагаемой методики приводится расчёт удельного числа перерывов электроснабжения существующей ВЛ-220кВ с тросовой защитой и удельного числа перерывов электроснабжения той же линии без троса (рис. 1). Данная методика была применена и внедрена в эксплуатацию в филиале ОАО Сетевая компания «Нижекамские электрические сети».

Грозоупорность различных пролётов может отличаться существенно. При проведении мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ следует в первую очередь обращать внимание на такие «ослабленные» пролёты. Сравнивая показатели грозоупорности (число отключений) пролётов участка ВЛ рис. 1 с тросом и без троса, можно заметить, что в пролётах с номерами 1, 5, 6, 8, 9 использование грозозащитного троса снижает грозоупорность линии. Всего на ВЛ обнаружено 10 таких пролётов. Установлено, что если длина пролёта становится больше некоторого значения $L_{кр}$ (рис. 2),

молниезащитный трос увеличивает устойчивость ВЛ к ударам молний. При меньшей длине пролёта – трос снижает грозоупорность ВЛ. Эта длина ($L_{кр}$) зависит от высоты опоры, импульсного сопротивления заземления ($R_{и}$) и стрелы провеса провода. На рис. 3 представлены графики зависимости этой длины пролёта от высоты опоры при различных значениях сопротивления заземления.

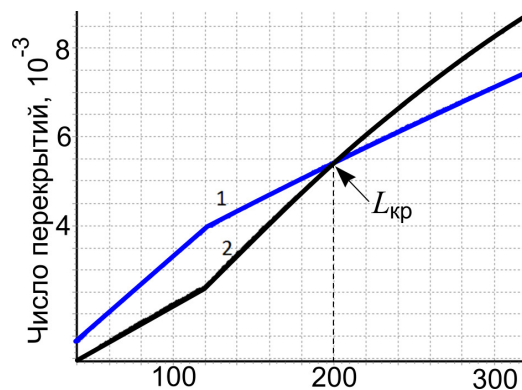
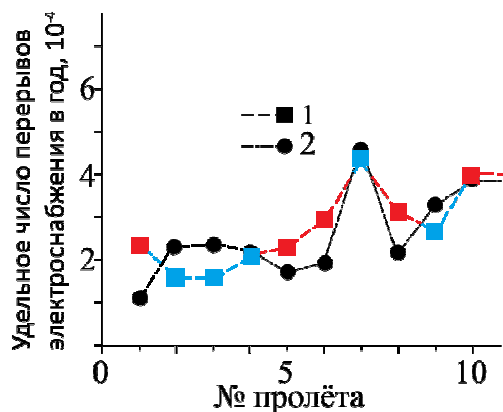


Рис. 1. Грозаупорность пролётов участка ВЛ 220 кВ: 1 – трос есть; 2 – грозозащитного троса нет

Рис. 2. График числа перекрытий линейной изоляции для пролетов ВЛ -220кВ с тросом и без троса различной длины с опорами высотой 30 м сопротивление заземления 10 Ом: 1 – с тросом , 2 – без троса.

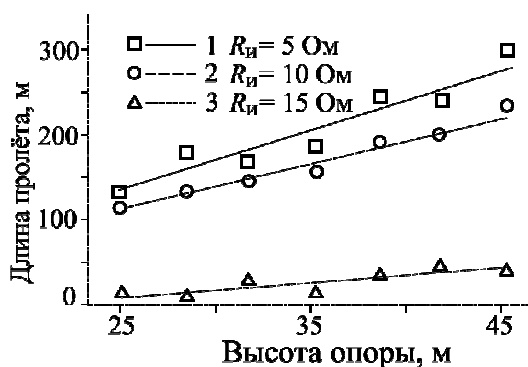


Рис. 3. Зависимость $L_{кр}$ от высоты опоры при различных $R_{и}$

Для учета влияния ветровой нагрузки на грозоупорность ВЛ, в соответствии с действующими ПУЭ и РД по молниезащите, был создан программный модуль «Ветер». Зависимость изменения грозоупорности пролёта

$$\Delta N = \frac{N_{в} - N_{0}}{N_{0}} \cdot 100\%, \text{ где } N_{0} \text{ и } N_{в} - \text{число перерывов электроснабжения без}$$

ветра и с учетом ветра, от скорости ветра, рассчитанная с использованием этого модуля, показана на рис. 4. При расчёте грозоупорности ВЛ в модуле считается, что искровой разряд между опорой и фазным проводом может идти по двум путям, как это описано в главе 3. При расчётах грозоупорности ВЛ важное значение имеет соотношение между ударами молнии в опоры ВЛ и в пролёт ($P_{оп}$). Обычно, доля ударов в опору принимается равной эмпирической $P_{оп} = 4h/L$, где h – высота опоры, L – длина пролёта.

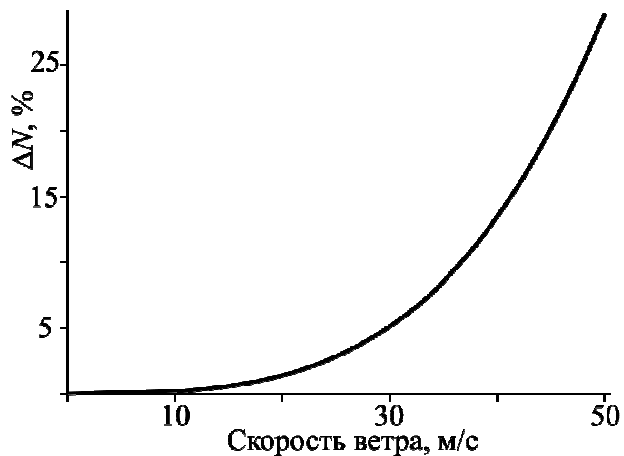


Рис. 4. Зависимость числа перерывов электроснабжения ВЛ от скорости ветра

Поскольку эта величина важна в предлагаемой методике расчёта, в работе представлены результаты определения доли ударов в опору электрогеометрическим методом (ЭГМ) (рис. 5, 6). В результате проведённых расчётов было установлено, что доля ударов в опору не зависит от высоты опоры, а зависит только от длины пролёта и стрелы провеса провода.

Эмпирическая величина доли ударов молнии в опору совпадает с долей ударов молнии в опору, рассчитанной по ЭГМ, при высоте опоры 30 м. Доля ударов в опору для ВЛ с тросовой защитой, рассчитанная по ЭГМ, получается существенно меньше, чем доля по эмпирической формуле (кривые 1, 3 рис. 5). Это связано с тем, что в расчётах молниезащиты ВЛ с тросами расчётным случаем является удар молнии в опору и в трос вблизи опоры.

Понятие «вблизи» не конкретизируется. При расчётах по ЭГМ доли ударов молнии в опору ВЛ с тросами, к расчётному расстоянию для каждой дистанции ориентировки молнии на опору добавлялась произвольная одинаковая величина. При добавлении 28 м результаты по ЭГМ совпадают с эмпирическими результатами при высоте опоры 18 м (кривая 4 рис. 6). Природа такой добавки не ясна, но полученная величина близка к величине $\lambda/10$, где λ - условная длина волны молнии.

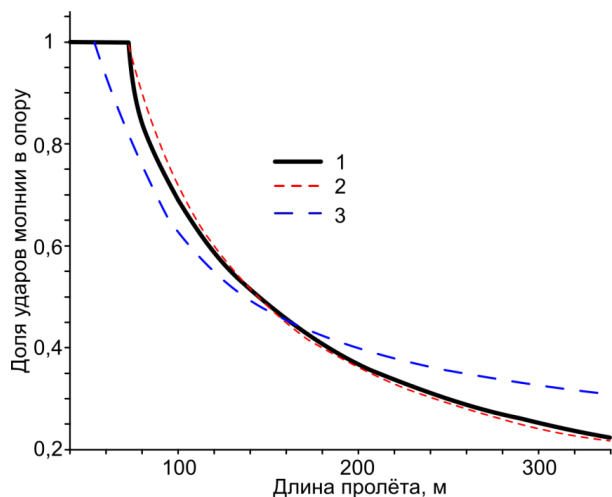


Рис. 5. Зависимости доли ударов молнии в опору ВЛ без троса ($P_{оп}$) от длины пролёта при высоте опоры

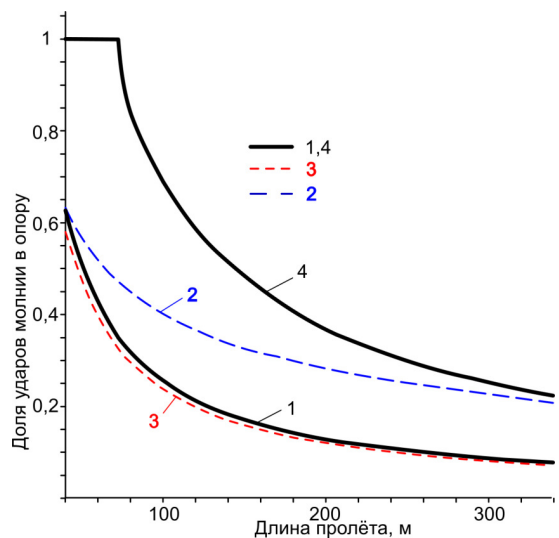


Рис. 6. Зависимости доли ударов молнии в опору ВЛ с тросом ($P_{оп}$) от длины пролёта при высоте опоры

30м: 1 –с учётом стрелы провеса провода; 2 – отношение $4h/L$ при высоте опоры 18 м; 3 – расчёт по средней высоте подвеса провода

30м: 1 –с учётом стрелы провеса троса; 2 – по средней высоте подвеса троса; 3 – по работе Илларионовой Е.Н; 4 – с учётом стрелы провеса троса с добавлением по 28 м к $L_{оп}$ в (12)

В третьей главе диссертации приводятся результаты экспериментальных исследований на созданном высоковольтном генераторе Тесла (рис. 7), которая моделирует в лабораторных условиях два возможных пути пробоя с опоры ВЛ на фазный провод (рис. 8а,б).

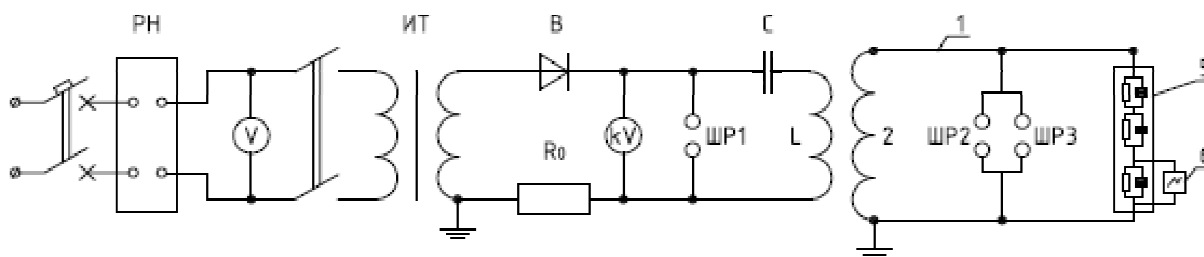


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Переменное напряжение 220 В через регулятор напряжения РН (0-250 В) подаётся на испытательный трансформатор ИТ. Накопительная ёмкость C заряжается от высоковольтной обмотки ИТ через высоковольтный выпрямительный столб B , зарядное сопротивление R_0 и индуктивность L . Время зарядки до напряжения 9-30 кВ регулировалось как величиной зарядного сопротивления, так и величиной первичного напряжения на ИТ и составляло от 0,5 до 5 секунд. Напряжение измерялось киловольтметром (kV) марки С-96 по высокой стороне ИТ. При достижении требуемого напряжения зарядки, которое регулировалось расстоянием между шарами шарового разрядника ШР1 пробивался. В контуре, образованном накопительной емкостью C , индуктивностью L и шаровым разрядником ШР1 возникают затухающие колебания с частотой порядка 90кГц. Эти колебания наводят в высоковольтном контуре, образованном вторичной обмоткой 2 воздушного трансформатора ВТ и паразитной емкостью между высоковольтным электродом 1 и землей высоковольтные колебания с напряжением до 450 кВ. Измерение напряжения по высокой стороне производилось с помощью универсального делителя 5 и цифрового осциллографа 6, подключенного к низковольтному выводу делителя 5.

Эксперименты проводились следующим образом:

1. выставлялось расстояние между электродами шар – шар в ШР2, подводилось импульсное напряжение от установки на катушках Тесла и измерялось число пробоев разрядного промежутка при подаче 1000 импульсов (10 серий по 100 импульсов в серии). Обработанные данные приводятся в столбце Р(1) эксп таблицы 1.

2. проводились измерения подобно пункту 1 при подаче напряжения на ШР3. Результаты обработки данных приведены в столбце Р(2);

3. при неизменных расстояниях из пунктов 1 и 2 напряжение подавалось одновременно на оба искровых промежутка. В этом эксперименте подсчитывалось общее число пробоев как по пути 1, так и по пути два. Данные статистической обработки приведены в столбце $P(12)$ эксп таблицы 1. Таких серий при различных расстояниях между шарами было выполнено 16, из которых 4 представлено в таблице 1.

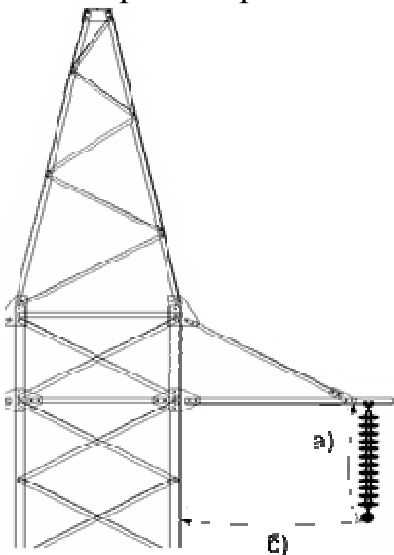


Рис. 8. Фрагмент: а) пробой вдоль изолятора на траверсу, б) пробой с провода на опору.

При расчетах грозоупорности ВЛ мы обычно знаем импульсную прочность гирлянды изоляторов (т.е. напряжение, при котором возникает искровой пробой воздуха по пути а) рис. 8). Можно также отдельно оценить импульсную прочность пути б) рис. 8. Однако, при расчётах грозоупорности ВЛ не имеет значения тип пути, по которому произойдет искровое перекрытие между опорой и проводом. Из анализа данных статистической обработки результатов лабораторных исследований пробоя (таблица 1) можно сделать предположение, что вероятность

пробоя между опорой и проводом выше, если существуют два возможных пути а) и б), чем вероятность при учёте только одного пути пробоя а) вдоль гирлянды изоляторов (рис. 8). Формула суммарной вероятности двух независимых несовместных событий (1) даёт наибольшее приближение к экспериментально полученной вероятности. Оценки вероятности пробоя по этой формуле ниже экспериментальной на ~20%. Вероятно, такое расхождение связано с тем, что пробоем промежутков предшествует стадия короны, излучение которой ослабляет параллельный воздушный промежуток. Поскольку можно считать экспериментально доказанным в лабораторных условиях повышение общей вероятности пробоя, предполагается, что в расчётах грозоупорности ВЛ следует принимать в расчёт второй путь пробоя, хотя бы по формуле (1).

Таблица 1. Результаты проведенных экспериментов

| № | $P(1)$ эксп | $P(2)$ эксп | $P(12)$ эксп | $P(12)$ по формуле (1) |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 1 | 0.65 ± 0.07 | 0.55 ± 0.07 | 0.99 ± 0.01 | 0.84 ± 0.03 |
| 2 | 0.93 ± 0.05 | 0.57 ± 0.04 | 0.99 ± 0.01 | 0.97 ± 0.02 |
| 3 | 0.49 ± 0.02 | 0.57 ± 0.02 | 0.92 ± 0.02 | 0.78 ± 0.02 |
| 4 | 0.49 ± 0.05 | 0.64 ± 0.06 | 0.94 ± 0.05 | 0.82 ± 0.03 |

$$P(12) = P(1) + P(2) \cdot (1 - P(1)) \quad (1)$$

В существующей методике расчёта грозоупорности учитывается только путь рис. ба, что приводит к завышенным значениям грозоупорности.

В четвертой главе диссертации предлагается новая концепция оценки защиты оборудования подстанций от волн грозowych перенапряжений (ВГПН), набегающих с линий электропередачи. Её основные положения заключаются в следующем:

1. Грозоупорность оборудования ПС зависит от числа опасных ВГПН, которые возникают при каждом искровом разряде на фазный провод в зоне защищённого подхода. Для каждого из пролётов общее число ВГПН складывается из 4 слагаемых для ВЛ с тросовой защитой (рис.9):

$$N=N_1+N_2+N_3+N_4 \quad (2)$$

где N_1 – число ударов молнии в опору и возникновение обратного перекрытия (искрового разряда) с опоры на фазный провод;

N_2 – число прорывов молнии через тросовую защиту с поражением фазного провода и возникновением искрового разряда с провода на опору;

N_3 – число возникновений искрового разряда между тросом и проводом при ударе молнии в трос с последующим перекрытием на опору;

N_4 – число ударов молнии в трос с обратным перекрытием на опоре.

2. Опасные для оборудования подстанций (ПС) волны грозowych перенапряжений с длительностью фронта $\sim 10 \div 40$ нс (можно считать с вертикальным фронтом) возникают при любом искровом перекрытии типа N_1, N_3, N_4 в (2), независимо от исходных параметров молнии.

3. Искровые разряды с провода на опору типа N_2 не приводят к возникновению крутого среза тока молнии, опасного для изоляции силовых трансформаторов, из-за существенной индуктивности опоры и импульсного сопротивления заземления.

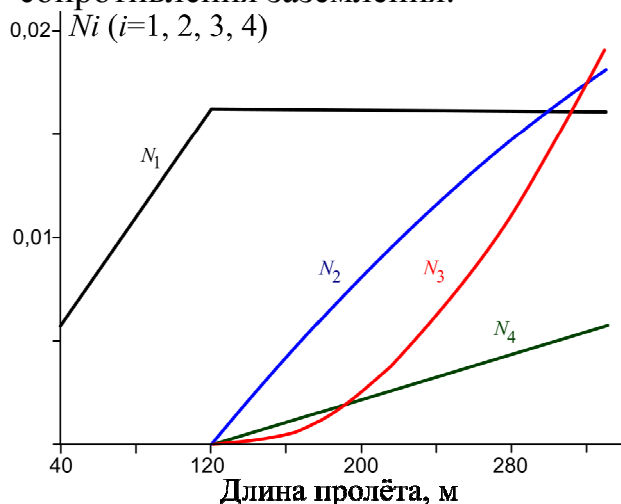


Рис. 9. Зависимость слагаемых грозоупорности (2) от длины пролёта

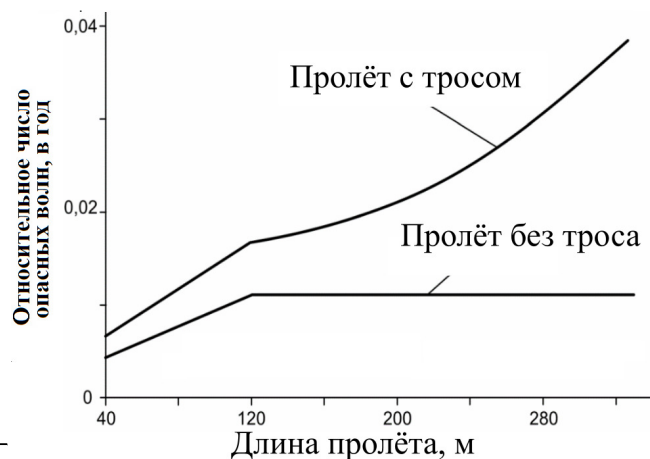


Рис. 10 Зависимость числа опасных волн ГПН с вертикальным фронтом от длины пролёта при высоте опоры 30 м

Обычно в расчётах грозоупорности ВЛ при ударе молнии в трос пренебрегают слагаемыми N_3 и N_4 и учитывают только вероятность прорыва тросовой защиты и последующего удара молнии в фазный провод. Это связано с тем, что вероятность возникновения устойчивой силовой дуги в

случае возникновения искрового разряда N_3 близка к нулю из-за большого расстояния трос-провод. Вместе с тем, величина вероятности искрового разряда N_3 и N_4 отличается от нуля и возрастает при увеличении длины пролёта. Из рис. 10 видно, что при любой длине пролёта число опасных волн в пролёте с тросом больше числа опасных волн в таком же пролёте без троса. Получается, что молниезащитный трос, улучшая грозоупорность ВЛ, как в целом, так и в опасной зоне, всегда увеличивает вероятность возникновения волн ГПН с крутым фронтом, опасным для оборудования ПС.

Для оценки формы волн ГПН, возникающих при ударах в опору и фазный провод ВЛ можно использовать схемы, представленные на рис. 11.

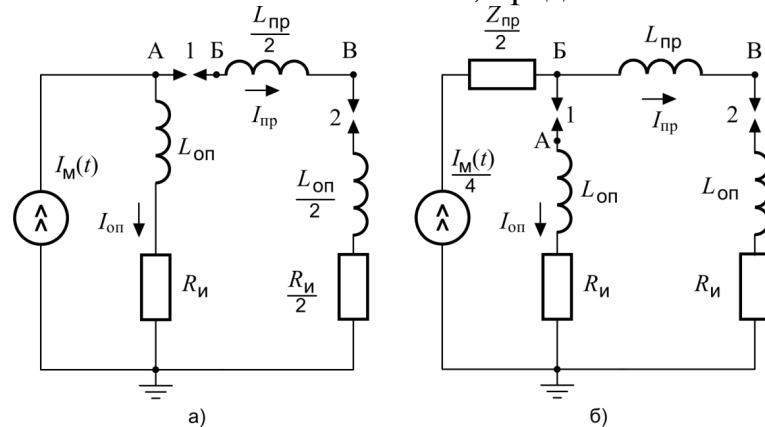


Рис. 11. Схемы для оценки волн ГПН, возникающих на ЛЭП при ударах молнии: а) – в опору, б) – в фазный провод

Символом А обозначена точка на траверсе опоры, в которую ударила молния (рис. 11а) или опоры, до которой дошла волна ГПН при ударе молнии в провод (рис. 11б); Б, В – точки на фазном проводе в месте крепления к гирлянде изоляторов первой и второй (по ходу волны ГПН) опоры, отсчитываемые от места удара молнии в ВЛ; символами 1 и 2 обозначены воздушные промежутки траверса – провод на первой и второй по ходу волны ГПН опорах. Сопротивление горячей дуги в 1 и 2, а также отражения от соседних опор рис. 11а в оценках не учитываются, поскольку не имеют принципиального значения.

При ударе молнии в опору (рис. 11а), по опоре протекает ток молнии, создавая на траверсе опоры возрастающее напряжение. Если это напряжение превысит напряжение пробоя промежутка 1, то на фазном проводе в точке Б возникнет напряжение такое же, что и на траверсе в точке А. Время нарастания напряжения на фазных проводах равно времени между началом искрового разряда промежутка 1 и его завершением. Скорость развития основного разряда воздушных промежутков, по различным данным, колеблется от 0,1 до 0,3 скорости света или от 30 до 90 м/мкс. При длине гирлянды, например, 1,2 м, время пробоя воздушного промежутка составит от 12 до 40 нс. Волна грозового перенапряжения с такой длительностью фронта является опасной волной для оборудования ПС. Такие волны можно с хорошей точностью считать волнами с прямоугольным фронтом. Аналогичным образом возникают опасные волны ГПН при ударе молнии в

грозозащитный трос с последующим перекрытием на опоре (N_4) и в середине пролёта (N_3).

Из такой концепции следует, что требования к оборудованию подхода ВЛ к ПС в опасной зоне должны быть пересмотрены таким образом, чтобы мероприятия приводили к снижению числа искровых перекрытий на фазные провода. Здесь можно привести некоторые из них: не использовать в опасной зоне защитные аппараты; снижать среднюю высоту ВЛ за счёт горизонтального расположения фазных проводов; использовать диэлектрические траверсы, снижать сопротивление заземления и удельную индуктивность опор; связь между последней опорой ВЛ и шинами ПС осуществлять кабельной вставкой с установкой ОПН со стороны ПС в качестве первого элемента каскадной защиты оборудования ПС.

В таблице 2 показаны различия существующей и предлагаемой концепций при оценке защищенности оборудования ПС от волн ГПН.

Таблица 2. Сравнение существующей методики и предлагаемой

| | Существующая | Предлагаемая |
|---|---|---|
| 1 | $\beta_2 = \sum_i n_{\text{вл}i} \frac{l_{\text{зп}i}}{100} \frac{D_r}{100} \left(\Delta_{\text{оп}} P_1 + \Delta_{\text{тр}} P_2 \right)$ | $\beta_2 = \sum_i n_{\text{вл}i} \frac{l_{\text{зп}i}}{100} \frac{D_r}{100} \left[\Delta_{\text{оп}} P_1 + \Delta_{\text{тр}} (P_3 + P_4) \right]$ |
| 2 | При прорыве тросовой защиты и поражении фазы образуются срезанные волны ГПН | При ударе в фазу срезанных волн не образуется |
| 3 | При ударе в опору и искровом разряде на фазу образуются волны с крутым фронтом в зависимости от параметров импульса молнии | При ударе в трос или опору при искровом перекрытии на фазу образуются волны с фронтом $\sim 10\div 40$ нс не зависимо от параметров импульса молнии |
| 4 | В пределах защищенного подхода трос повышает грозоупорность оборудования ПС | В пределах защищенного подхода трос увеличивает число опасных для оборудования ПС волн |

В **заключении** диссертационной работы подводится итог проведенным исследованиям и приводятся основные результаты и выводы:

1. Модифицированная методика расчёта числа отключений (грозоупорности) ВЛ основана на суммирования числа отключений ВЛ из-за удара молний в каждый пролёт. Разработаны алгоритм и создан комплект программ расчёта на ЭВМ. Методика позволяет выявлять участки с низкими показателями грозоупорности, а также участки ВЛ, где грозозащитный трос снижает показатели грозоупорности, что позволяет оптимизировать затраты на обеспечение надёжности электроснабжения.

2. На основании расчетов, проведенных по электрогеометрическим и вероятностным методикам, установлено, что доля ударов молний в опоры на ВЛ без тросовой защиты отличается от 1/2 и зависит от высоты опоры, стрелы провеса провода и длины пролёта, а на линиях электропередачи существует такая длина пролёта ($L_{кр}$), меньше которой установка молниезащитного троса увеличивает число аварийных грозовых отключений.

3. Показано, что ветер со скоростями до 30 м/с, направленный перпендикулярно пролёту ВЛ снижает грозоупорность не более чем на 5% и может не учитываться. При скоростях ветра свыше 30 м/с необходимо учитывать возникновение ветровой нагрузки. Учёт ветровой нагрузки приводит к увеличению расчетного числа отключений, т.е. повышению точности проводимых расчетов грозоупорности ВЛ.

4. Экспериментально в лабораторных условиях показано, что наличие двух возможных путей пробоя воздушных промежутков повышает общую вероятность пробоя и получена формула общей вероятности пробоя.

5. На основании расчётов показано, что волны, с фронтом волны близким к вертикальному ($c T1 < 40$ нс), возникают при каждом ударе молнии в ВЛ, если при этом происходит либо обратное перекрытие с опоры на провод ВЛ, либо перекрытие с грозозащитного троса на фазный провод. Грозозащитный трос, в зоне защищённого подхода, уменьшает число ударов в фазные провода с $T1 \sim 4-8$ мкс, не опасные для оборудования подстанций с ОПН, и увеличивает число опасных для оборудования волн с передним фронтом 10-40 нс.

Работа выполнялась на кафедре «Электрические станции» Казанского государственного энергетического университета.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованные в ВАК

1. Усачев А.Е. Вероятность искрового разряда на провод высокого напряжения при ударе молнии в опору // А.Е. Усачев, Д.М. Юдицкий // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. № 5-6. – Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2013. - С.119-123.

2. Усачев А.Е. Относительная вероятность ударов молнии в опоры воздушных линий электропередачи: расчёт электрогеометрическим методом. // А.Е. Усачев, Д.М. Юдицкий // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. № 9-10. - Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2014. – С.47-54.

3. Усачев А.Е. Методика расчёта грозоупорности воздушных линий электропередачи по параметрам опор и пролётов с учётом ветровой нагрузки. // А.Е. Усачев, Д.М. Юдицкий // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. № 7-8. - Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2014. - С.70-76

4. Усачев А.Е. Новая концепция защиты подстанций от волн грозовых перенапряжений. / А.Е. Усачев, Д.М. Юдицкий / Известия высших

учебных заведений: Проблемы энергетики. № 11-12. - Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2014. – С.94-100.

Публикации в других научных изданиях

5. Юдицкий Д.М. Об оценке вероятности возникновения обратного перекрытия при ударе молнии в опору линии электропередачи // Д.М. Юдицкий // IX международная научно-практическая конференция «Ключевые проблемы современной науки – 2013». – София. – 2013г. – С. 81.

6. Юдицкий Д.М. Совершенствование существующего алгоритма методики расчета грозоупорности воздушных линий электропередачи 110-220кВ // Д.М. Юдицкий // VII Открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация в электроэнергетике: Проблемы и перспективы». – Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2012г. – С. 19.

7. Юдицкий Д.М. К совершенствованию методики расчета грозоупорности воздушных линий электропередачи 110-220кВ // Д.М. Юдицкий, А.Е. Усачев // XVI аспирантско – магистерский научный семинар. Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2012.

8. Юдицкий Д.М., Вероятность возникновения обратных перекрытий при ударе молнии в ЛЭП// Д.М.Юдицкий, А.Е. Усачев//IX Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». - Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2014. Т1. – С. 98.

9. Юдицкий Д.М. Совершенствование методики расчета грозоупорности ВЛЭП 110-220кВ // Д.М.Юдицкий, А.Е. Усачев //IX Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». - Казань: Казан. Гос.энерг. ун-т. – 2014. Т1. – С. 97.

10. Юдицкий Д.М., Усачев А.Е. «О совершенствовании методики комплексного расчета грозоупорности воздушных линий электропередачи 110-220кВ» // Д.М. Юдицкий, А.Е. Усачев // Materiály X mezinárodní vědecko - praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2014». - Díl 38. Technické vědy.: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o - 112 stran.

11. Юдицкий Д.М., Усачев А.Е. «Оценка вероятности возникновения обратного перекрытия при ударе молнии в опору ЛЭП» / Д.М. Юдицкий, А.Е. Усачев // Materiály X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa myśl informacyjnej powieki - 2014» Volume 30. Techniczne nauki.: Przemysł. Nauka i studia - 80 str.

12. Юдицкий Д.М. Расчет показателей грозоупорности воздушных линий электропередач. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ // Д.М.Юдицкий, А.Е. Усачев. – № 2014618251; заявл. 17.06.2014; рег. 13.08.2014.