

*На правах рукописи*



**КАЗАКОВА Светлана Алексеевна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
И РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ  
ДЛЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Овсянников Александр Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** **Корявин Алексей Родионович**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Всероссийский электротехнический институт – филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр. Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», главный научный сотрудник  
**Наумкин Иван Егорович**  
кандидат технических наук,  
Общество с ограниченной ответственностью «Болд», начальник отдела интеллектуальных электрических систем, заместитель директора по науке

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита состоится: «25» октября 2018 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [http://www.nstu.ru/files/dissertations/kazakova\\_s.a.\\_dissertaciya\\_kor2\\_152842276262.pdf](http://www.nstu.ru/files/dissertations/kazakova_s.a._dissertaciya_kor2_152842276262.pdf)

Автореферат разослан «    » сентября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Анастасия Георгиевна Русина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Основными элементами связи при объединении энергосистем являются воздушные линии электропередачи (ВЛ) классов напряжения (220 – 750) кВ. Усиление требований к надёжности межсистемных ВЛ со стороны системного оператора и увеличение экономических потерь при их отключениях обуславливают актуальность обслуживания и ремонта ВЛ без снятия напряжения. Производство ремонтных работ под напряжением (ПРН) практикуется в России и в других странах уже много лет. Разумеется, ПРН имеют право на существование только при обязательном обеспечении безопасности ремонтного персонала. В этой проблеме, наряду с общими правилами охраны труда при работе в электроустановках выше 1000 В, выделяют три специфических вопроса. Первый вопрос – разработка безопасных технологий и специальная профессиональная подготовка ремонтного персонала в учебных центрах и на полигонах. Большой вклад в решение этого вопроса внесли коллективы ОРГРЭС, ПО ДЭП, СибНИИЭ и других организаций, а также ведущие специалисты: И.Г. Барг, С.В. Полевой, В.А. Сибирцев, А.М. Батраков, В.П. Дикой, Н.М. Коробков, О.В. Богданов и др.

Второй вопрос связан с защитой персонала от воздействия электрических и магнитных полей промышленной частоты, напряжённости которых (особенно электрического поля) в зонах ПРН заметно превышают допустимые нормы. В число вредных факторов входят также повышенные концентрации озона, окислов азота и аэроионов, которые возникают из-за короны на проводах и арматуре работающей линии. Для снижения влияния указанных факторов на здоровье ремонтного персонала были разработаны санитарно-гигиенические нормы ограничительного характера и средства защиты. Большую роль в их разработках сыграли Н.Б. Рубцова, Э.П. Каскевич, Г.Ф. Плеханов, Б.М. Савин, В.В. Смекалов и др.

Третий в данном перечислении, но главный, по сути, вопрос, связан с исключением перекрытий воздушных промежутков в зоне производства работ. Этот вопрос, называемый в данной работе обеспечением электробезопасности, решают предварительной проверкой достаточности изоляционных расстояний в зоне ПРН. Они должны быть больше минимальных допустимых расстояний между потенциальными и заземлёнными элементами, которые регламентируются национальными стандартами и обеспечивают требуемое разрядное напряжение воздушных промежутков в зоне ПРН, в том числе при воздействии случайных коммутационных перенапряжений. Исследования разрядных напряжений изоляции и перенапряжений, представленные в работах Г.Н. Александрова, Г.В. Подпоркина, О.В. Волковой, А.Р. Корявина, А.С. Гайворонского и других учёных, послужили основой работ по обеспечению электробезопасности ПРН.

Вероятность перекрытия промежутков в зоне ПРН непосредственно связана и с характеристиками коммутационных перенапряжений. Исследования перенапряжений и разработка способов их ограничения проводились Ф.Х. Халиловым, Г.А. Евдокуниним, К.П. Кадомской, В.Е. Качесовым и др.

Ряд задач обеспечения безопасности ПРН продолжают оставаться в поле внимания исследователей многих стран. К таким задачам можно отнести, прежде всего, оценку степени риска перекрытий воздушных промежутков при недостаточных изоляционных расстояниях в зоне ПРН. Подобные ситуации возникают при необходимости ПРН на некоторых типах опор эксплуатируемых линий и неизбежно возникнут на будущих ли-

ниях компактного исполнения. Решение вопроса электробезопасности ПРН в таких случаях могли бы облегчить мероприятия по ограничению перенапряжений. Однако, специальные защитные аппараты для ограничения амплитуды возможных коммутационных перенапряжений и предотвращения, тем самым, перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН, отсутствуют. Их создание имеет хорошие перспективы на внедрение. Конечно, разработка защитных аппаратов немыслима без формирования требований к ним на основе детальных расчётов случайных перенапряжений с учётом различных влияющих факторов, разрядных характеристик промежутков в зоне ПРН и т.д. Решение перечисленных вопросов весьма актуально.

Кроме того, существуют и более мелкие, но требующие рассмотрения и актуализации вопросы организации ПРН. Одним из них можно назвать оценку экономической эффективности ПРН, которая не пересматривалась более полувека.

**Объектом исследования** являются ремонтные работы под напряжением на воздушных линиях электропередачи классов напряжения 220 и 500 кВ.

**Предметом исследования** являются разрядные характеристики изоляционных промежутков в зоне ПРН, коммутационные перенапряжения и средства их ограничения.

**Связь темы диссертации с общенаучными программами.** Работа выполнялась в соответствии с научными направлениями технического комитета № 78 «Работы под напряжением» Международной электротехнической комиссии (МЭК), в том числе одновременно с разработкой новой редакции базового стандарта IEC 61472: Live working – minimum approach distances for AC systems in the voltage range 72.5 kV to 800 kV – a method of calculation.

**Целью работы** является повышение электробезопасности персонала при выполнении работ под напряжением на воздушных линиях высокого напряжения. Защиту ремонтного персонала от перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН предлагается выполнять с помощью защитных аппаратов для ограничения амплитуды коммутационных перенапряжений, которые могут случайно возникнуть во время работ. Для достижения этой цели в работе ставились и решались следующие научно-технические задачи:

- провести обзор отечественных и зарубежных технологий ПРН с выделением вопросов обеспечения электробезопасности;
- произвести расчёты коммутационных перенапряжений, которым могут подвергнуться изоляционные промежутки, оснастка и ремонтный персонал;
- оценить разрядные характеристики изоляционных промежутков в зоне ПРН и влияние на них различных факторов;
- разработать технические требования к защитным аппаратам на основе нелинейных ограничителей напряжения (ОПН), которые можно применить для обеспечения безопасности персонала при ПРН на ВЛ 220 и 500 кВ;
- изготовить опытные образцы защитных аппаратов и провести их высоковольтные испытания;
- оценить диапазон допустимых изоляционных расстояний в зоне ПРН и снижение степени риска ПРН в результате применения защитных аппаратов;
- разработать проект технологической карты по монтажу защитных аппаратов;
- предложить коррективы оценки экономической эффективности, учитывающие особенности сложившегося рынка электрической энергии и мощности.

**Методы исследования.** В процессе выполнения исследований проводился анализ и обобщение литературных данных по тематике исследований, расчёты по универсальным и специализированным компьютерным программам, высоковольтные испытания защитных аппаратов. При обработке результатов испытаний и результатов расчётов применялись методы математической статистики и теории вероятностей.

**На защиту выносятся:**

1. Дополнения в методику расчёта разрядных напряжений воздушных изоляционных промежутков в зоне производства работ под напряжением, связанные с учётом конструкции и габаритов опоры, взаимного расположения зоны ПРН и проводов ВЛ.

2. Результаты расчётов кратности перенапряжений и их распределения по длине линий классов напряжения 220 и 500 кВ при случайных однофазных коротких замыканиях и автоматических повторных включениях, в том числе, перенапряжений, ограниченных с помощью разработанных защитных аппаратов.

3. Определённое расчётным путём интегральное распределение плотности вероятности длительности фронта коммутационных перенапряжений при коротких замыканиях и автоматических повторных включениях.

4. Технические требования и конструкции защитных аппаратов ОПН-ПРН 220 и 500 кВ, результаты высоковольтных испытаний опытных образцов и проект технологической карты по их монтажу на линии.

5. Дополнение в оценку экономической эффективности ПРН, связанное с оптимизацией загрузки генерирующих мощностей на время ремонтного периода.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечена применением в экспериментах сертифицированного испытательного оборудования, поверенных измерительных приборов и стандартных методов высоковольтных испытаний, корректным использованием аппарата волновых процессов для расчётов коммутационных перенапряжений в линиях электропередачи и лицензированного программного обеспечения. Обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждена публикациями результатов исследований.

**Научная новизна работы**

1. Определены основные характеристики коммутационных перенапряжений, возникающих при однофазном коротком замыкании и автоматическом повторном включении на ВЛ 220 и 500 кВ и влияющих на электрическую прочность изоляционных промежутков в зоне производства ремонтных работ под напряжением:

- зависимости кратности перенапряжения от вида и взаимного расположения места короткого замыкания и места проведения ремонта по длине линии;
- распределения плотности вероятности по длительности фронта перенапряжений.

2. На основе полученных данных разработаны основные технические требования к характеристикам защитных аппаратов ОПН-ПРН.

3. В рекомендованной МЭК методике расчёта минимальных изоляционных расстояний введены корректирующие коэффициенты, учитывающие влияние на электрическую прочность воздушных изоляционных промежутков длительности фронта коммутационных перенапряжений, конструкции и размеров опоры, а также взаимного расположения зоны ПРН и проводов линии. Эти же корректировки могут быть использованы в вероятностной методике оценки степени риска ремонтных работ под напряжением.

4. Определены минимальные допустимые изоляционные расстояния в зоне производства ремонтных работ под напряжением на линиях 220 и 500 кВ при условии ограничения коммутационных перенапряжений специальными защитными аппаратами.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии методики расчёта разрядного напряжения изоляционных промежутков в зоне ПРН, определяющей выбор допустимых технологических расстояний, а также уровень требуемого ограничения случайных коммутационных перенапряжений.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что за счёт применения разработанных защитных аппаратов обеспечивается возможность проведения работ под напряжением на линиях 220 и 500 кВ со сниженными изоляционными расстояниями и без вывода из работы устройств автоматического повторного включения. Совокупность полученных результатов создаёт основу для решения важной научно-технической задачи по обеспечению бесперебойного электроснабжения потребителей энергии.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам научной специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений.

п.1 Исследование физических закономерностей и разработка методов расчёта электрических разрядов в условиях характерных для электроустановок высокого напряжения (молнии и другие атмосферные явления).

п. 5 Исследование атмосферных и внутренних перенапряжений, разработка методов и устройств ограничения перенапряжений, изучение проблем электромагнитной совместимости.

**Реализация работы.** Опытные образцы ОПН-ПРН 220 и 500 кВ переданы в опытно-промышленную эксплуатацию в ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС». Рекомендации по применению защитных аппаратов ОПН-ПРН 220 и 500 кВ внедрены в МЭС Сибири с суммарным ожидаемым годовым экономическим эффектом 460 тыс. руб. при сроке окупаемости капитальных вложений менее двух лет.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих форумах: международной молодёжной н.-техн. конф. «Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование» Самара, 2010 г.; 7-м семинаре Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок, Хабаровск, 2012 г.; пятой Российской научно-практ. конференции с международным участием "Линии электропередачи 2012: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс", Новосибирск, 2012 г.; 18-м международном симпозиуме по технике высоких напряжений (ISH), Сеул, Корея, 2013 г.; I-й международной научн. конф. «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», Новосибирск, 2014 г.

**Личный вклад.** Постановка научно-исследовательских задач и их решения, научные положения, выносимые на защиту, основные выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору. Личный вклад в работах, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 50 %.

**Публикации.** Содержание работы изложено в 11 научных трудах, в том числе, в 4-х статьях периодических изданий по перечню ВАК и одном докладе на международном симпозиуме по технике высоких напряжений.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 115 наименований и шести приложений. Содержание изложено на 167 страницах машинописного текста, который поясняется 62 рисунками и 27 таблицами.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и научные задачи исследования; приведены основные научные результаты выносимые на защиту; показана научная новизна исследований и оценена их практическая значимость; отражены уровень апробации и личный вклад соискателя в решении научных задач; приведены сведения о структуре диссертационной работы и объёме публикаций.

**В первой главе** приведён обзор мировых технологий производства ремонтных работ под напряжением. Констатируется, что необходимость ПРН возникает преимущественно на ВЛ, а в технологии работ на ВЛ (220 – 750) кВ наибольшее распространение получила схема «провод – человек – изоляция – земля». Критически проанализированы вопросы обеспечения электробезопасности верховых электромонтёров работающих на потенциале провода. Указанную проблему решают выбором минимальных изоляционных расстояний между потенциальными и заземлёнными элементами ремонтной схемы. При этом рекомендуемые значения расстояний базируются на знании характеристик перенапряжений и оценках электрической прочности промежутков в зоне ПРН. По итогам анализа выделены вопросы, требующие дальнейших исследований и решения.

– В стандарте МЭК электрическая прочность определяется расчётом, но только для критической длительности фронта перенапряжения, что недостаточно для оценки степени риска. Кроме того, расчёты базируются на эмпирической зависимости электрической прочности промежутка «стержень-плоскость», полученной в лабораторных условиях без моделирования электростатического влияния сторонних объектов, например, соседних проводов ВЛ или шин подстанции, находящихся под потенциалом другой величины и знака. Дальнейший переход к промежутку «провод-опора», выполнен без учёта возможного влияния на электрическую прочность конструктивных параметров опоры, например, ширины стойки и наличия других заземлённых элементов: траверсы, грозозащитного троса и оттяжек.

– В ряде случаев изоляционные промежутки в зоне предполагаемых работ под напряжением оказываются меньше расстояний, предельно допустимых по нормативным документам и расчётам. Мерами по обеспечению безопасности выполнения работ могут быть изменения траектории перемещения электромонтёра и оснастки между заземлёнными и находящимися под напряжением элементами ВЛ или установка защитных искровых промежутков, ограничивающих амплитуду возможных перенапряжений. При этом первое мероприятие не всегда удаётся реализовать, а монтаж защитных промежутков чреват отключениями ремонтируемой линии при срабатывании (пробое) искровых промежутков.

– Представляется перспективным для ограничения перенапряжений использовать специальные защитные аппараты на основе нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). Для их разработки необходимо провести тщательные исследования возможных коммутационных перенапряжений, обосновать выбор необходимых характеристик и конструкции защитных аппаратов, совместно с производителями разработать опытные образцы и провести их высоковольтные испытания.

– Необходимо также оценить и общие условия реализации ПРН, учитывающие не только технические, но и некоторые экономические аспекты.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы расчёта разрядных характеристик воздушных промежутков на основе ряда эмпирических зависимостей.

Известна эмпирическая зависимость электрической прочности промежутка «провод – стойка опоры» длиной  $S$  при критической длительности фронта

$$U_{50,кр}^{п-о} = \frac{4250}{1+8/d} \quad (1)$$

В упомянутом выше стандарте МЭК 61472 ту же величину определяют, умножая разрядное напряжение промежутка «стержень – плоскость» на коэффициент промежутка «провод – опора»,  $k_g = 1.2$

$$U_{50,кр}^{п-о} = U_{50,кр}^{с-п} \cdot k_g = 1080 \cdot \ln(0.46d + 1) \cdot k_g \quad (2)$$

Большинство коммутационных перенапряжений имеют длительность фронта значительно больше критической, которой соответствует минимум разрядного напряжения. Зависимость напряжения перекрытия воздушного промежутка «провод – стойка опоры» от длительности фронта, описывается эмпирическим выражением

$$U_{50}(T_\Phi) = U_{50,кр} \cdot \left[ 1.255 - 0.51 \left( \frac{T_{\Phi,кр}}{T_\Phi} \right) + 0.255 \left( \frac{T_{\Phi,кр}}{T_\Phi} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Изменения электрической прочности от длины фронта, известны как  $U$ -образные кривые. Минимумы в них соответствуют критической длительности фронта, мкс,

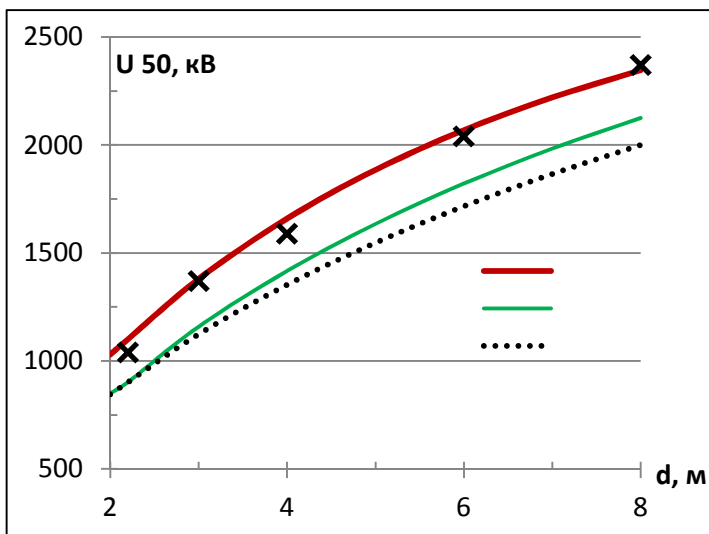


Рисунок 1 – Зависимости 50% - го напряжения перекрытия воздушного промежутка «провод-стойка опоры» от его длины при положительной полярности импульсного напряжения и длительности фронта 1000 мкс (1) и критической (2,3); (1 – 3) – расчёт, 4 – эксперимент

Экспериментальные данные, полученные при высоковольтных испытаниях полномасштабного макета «провод крайней фазы – стойка и траверса опоры» (ряд 4) при длительности фронта того же порядка почти совпадают с расчётной кривой (1).

$$T_{\Phi,кр} \cong 45d, \quad (4)$$

где  $d$  – длина промежутка, м.

На рисунке 1 кривые 2 и 3, построенные по выражениям (1) и (2), соответственно, приведены вместе. Видно небольшое расхождение кривых при увеличении длины промежутка. По-видимому, оно объясняется неопределённостью в выборе численного значения коэффициента,  $k_g \geq 1.2$ . На том же рисунке кривая 1 отражает зависимость электрической прочности воздушного промежутка при длительности фронта 1000 мкс, рассчитанную из (1) с учётом (3). Экспериментальные данные, полу-



Поэтому для ПРН на ВЛ, расчёт надо проводить по выражению (1) с корректирующими коэффициентами, рекомендованными стандартом МЭК:

$k_S$  – коэффициент запаса, который принимается равным 0,936;

$k_a$  – коэффициент, учитывающий высоту над уровнем моря;

$k_f$  – коэффициент, учитывающий влияние на прочность “изолированных объектов с плавающим потенциалом”;  $k_f = 0,85$  при размерах объектов более 0,3 м, а в остальных случаях,  $k_f = 1$ ;

$k_i$  – коэффициент, учитывающий наличие дефектных изоляторов в гирлянде, около которой производятся работы под напряжением;

$$k_i = 1 - 0.8 \cdot k_d \cdot n_d / n_0, \quad (5)$$

где:  $n_d$  – число дефектных изоляторов в гирлянде;  $n_0$  – исходное число “здоровых” изоляторов в гирлянде;  $k_d$  – коэффициент, учитывающий материал изоляторов,  $k_d = 1$  для стеклянных и  $k_d = 0.75$  для фарфоровых изоляторов.

Кроме перечисленных корректировок, автором предложено учитывать влияние на электрическую прочность ещё нескольких факторов, которые не отмечены в методике МЭК.

– Во-первых, следует учесть влияние на разрядные характеристики промежутков в зоне ПРН других, кроме стойки заземлённых элементов конструкции опоры. Известно, что разрядные напряжения снижаются по мере увеличения числа заземлённых элементов, окружающих провод, а самые низкие из них соответствуют расположению провода в окне опоры. К счастью, при реальных соотношениях расстояний до того или иного элементов опоры выдерживаемое напряжение в зоне ПРН, остаётся почти постоянным. Снижается только коэффициент вариации разрядных напряжений.

– Во-вторых, необходимо учесть влияние на электрическую прочность промежутков ширины стойки опоры,  $B$ , обращённой к проводу, например, известной эмпирической зависимостью

$$k_B = U_{50}(B) / U_{50}(1) = 1.03 - 0.03B, \quad (6),$$

где  $U_{50}(1)$  – разрядное напряжение при  $B = 1$  м.

– В третьих, впервые предложено учитывать влияние соседних фазных проводов на электрическую прочность рассматриваемой системы изоляционных промежутков в зоне проведения работ введением корректирующего коэффициента,  $k_n$ . Если зона ПРН расположена вблизи узла подвески, то она экранируется стойками опоры на опоре, и влияние соседних фазных проводов невелико:  $k_n \approx 0.97$ . При работах в середине пролёта ВЛ величина  $k_n \approx 0.85$ .

Длительности фронтов перенапряжений, необходимые в расчётах прочности и определённые расчётами перенапряжений, приведены ниже в таблице 1.

Окончательно рекомендуется проводить оценку напряжения перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН по эмпирическим зависимостям с учётом всех корректирующих коэффициентов. Для последующей оценки степени риска расчёты необходимо проводить четыре раза, т.е. для двух длительностей фронта и двух длин промежутков: проектной длины и скорректированной от проектной длины в меньшую сторону за счёт введения при ремонтах оснастки и приспособлений, включая монтерский стул и

электромонтёра.

**Третья глава** посвящена исследованиям коммутационных перенапряжений в ВЛ 220 и 500 кВ. Параметры приёмных и питающих систем, а также длины ВЛ и типы опор были взяты типичными для магистральных сетей сибирского региона. В расчётные схемы ВЛ 500 кВ по концам ВЛ были включены шунтирующие реакторы. Линии предполагались выполненными без и с транспозицией фазных проводов. В расчётах варьировались точки КЗ и точки ПРН. КЗ моделировались на крайнем и среднем фазных проводах ВЛ. Шаг расчета варьировался четвертью длины ВЛ. Для расчётов использовался пакет EMTP (рисунок 2).

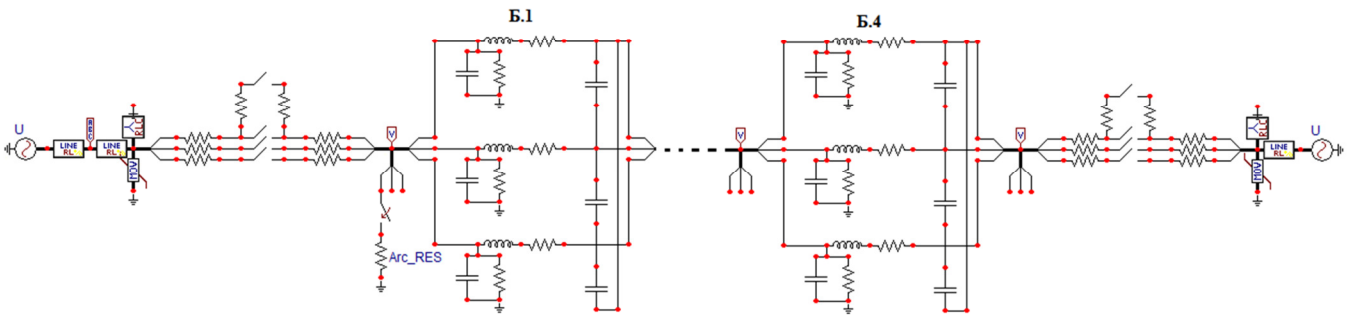


Рисунок 2 – расчётная схема для ОАПВ на линии 500 кВ с транспозицией фаз и с защитным аппаратом ОПН – ПРН – 500

Исследовались следующие коммутации: однофазные короткие замыкания (КЗ) на землю и автоматическое повторное включение, трёхфазное (ТАПВ) для ВЛ 220 кВ и однофазное (ОАПВ) для ВЛ 500 кВ.

Момент КЗ в расчётах соответствовал амплитудному значению напряжения на закорачиваемой фазе. В цикле повторного после паузы отключенного состояния момент включения выбирался, соответствующим максимальным кратностям перенапряжений.

По результатам расчётов определялись характеристики перенапряжений, влияющие на вероятность перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН: амплитуды и длительности фронтов, которые определялись по времени нарастания напряжения выше напряжения общей короны (417.2 кВ для ВЛ 500 кВ и 203.3 кВ для ВЛ 220 кВ) до амплитуды перенапряжения. Для определения длительностей фронта перенапряжений, приведённых в таблице 1, были проведены несколько сотен расчётов с вариацией участка ВЛ и моментов событий.

Таблица 1 – Статистические характеристики фронтов перенапряжений

Вид коммутации	Характеристики фронта		Доля $T_{ф.кр.}$ , %, не более
	$T_{ф. ср.}$ , мкс	$\sigma_{ф.}$ , мкс	
КЗ на ВЛ 220 кВ	202	95	2.2
ТАПВ ВЛ 220 кВ	260	131	4.7
КЗ на ВЛ 500 кВ	721	368	1.6
ОАПВ ВЛ 500 кВ	600	246	4.1

При моделировании защитного аппарата порог срабатывания был взят в соответствии с измеренными в испытаниях характеристиками срабатывания аппаратов. В ре-

в результате порог срабатывания составил примерно 2 для аппарата ОПН-ПРН-220 кВ и около 1,8 для аппарата ОПН-ПРН-500 кВ. При этом распределение напряжения между искровым промежутком и ОПН в расчётной схеме учитывалось выбором ёмкостей, включенным параллельно этим элементам.

На рисунке 3 в качестве примера приведены расчётные осциллограммы фазных напряжений при ОАПВ ВЛ 500 кВ в отсутствие защитных аппаратов.

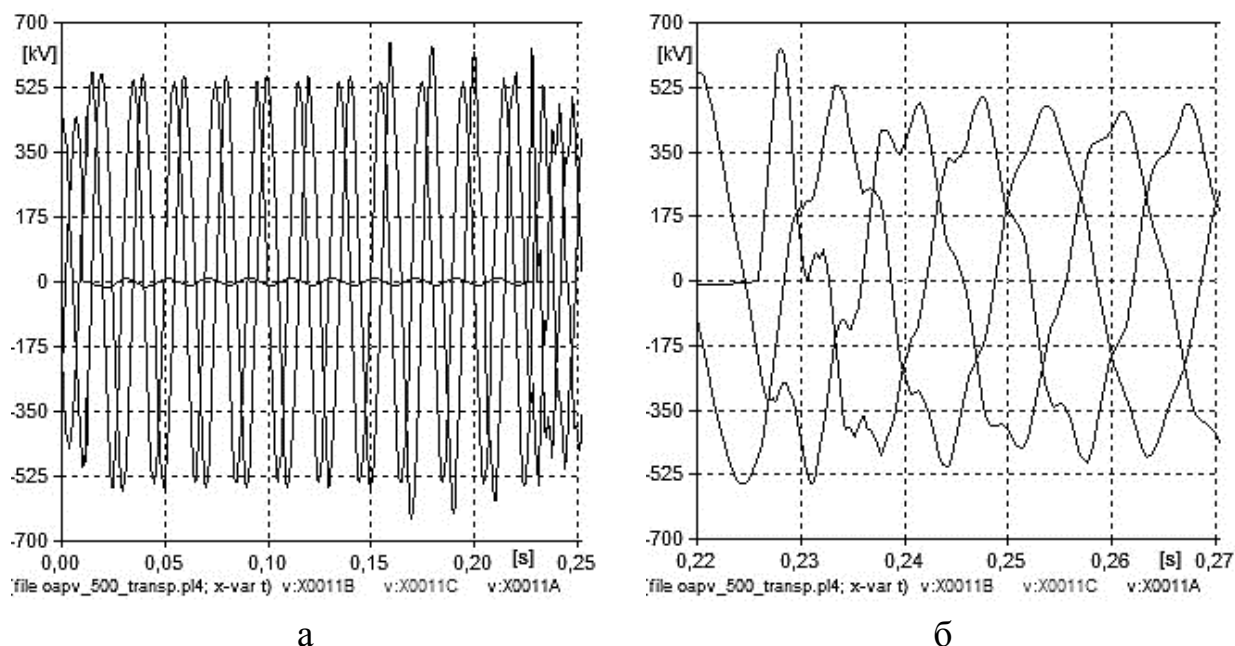


Рисунок 3 – Расчётные осциллограммы фазных напряжений в цикле ОАПВ ВЛ 500 кВ (а) и их фрагмент (б)

Определив мгновенные значения напряжения на ремонтируемой фазе и напряжения на соседних фазных проводах в момент времени, соответствующем амплитуде перенапряжения положительной полярности, можно скорректировать величину электрической прочности для последующей оценки вероятности перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН. В таблице 2 в качестве примера приведены мгновенные значения напряжений на всех фазных проводах в момент повторного включения, взятые из расчётов. Эффективность работы защитного аппарата оценивалась для уровня его срабатывания, соответствующем кратности перенапряжений  $k_{п} = 1.8$  и 2, соответственно.

Таблица 2 – Мгновенные значения фазных напряжений в момент повторного включения линий 220 и 500 кВ

ТАПВ на ВЛ 220 кВ				ОАПВ на ВЛ 500 кВ			
	$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ		$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ
без ОПН	+465	-250	-130	без ОПН	995	-165	-525
с ОПН	+360	-235	-100	с ОПН	600	-170	-550

Результаты расчётов содержали следующие особенности.

– Кратность неограниченных перенапряжений при однофазных коротких замыканиях на землю не превышает 1,8 и 1,7 для ВЛ 220 и 500 кВ, соответственно. Поэтому,

если на время ПРН устройства автоматического повторного включения линий выводить из работы, то ограничивать перенапряжения не надо.

– При ТАПВ ВЛ 220 кВ перенапряжения, возникающие в какой-либо из зон ПНР, не зависят от точки короткого замыкания, вызвавшего отключение ВЛ в случае, если происходит полное стекание зарядов с линии за время бестоковой паузы. В большинстве же случаев некоторый заряд на линии остается, его величина зависит от величины сопротивления изоляции, и максимальные значения кратности возникающих перенапряжений достигают 2,6

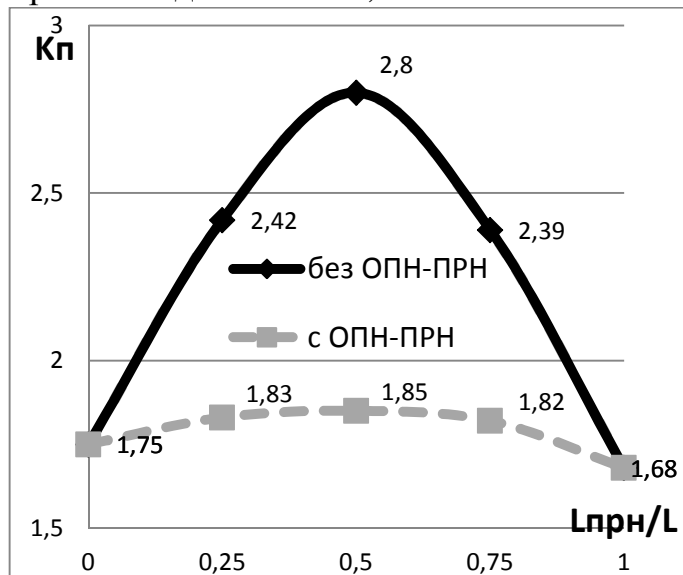


Рисунок 4 – Максимальные кратности перенапряжений при однофазном автоматическом повторном включении ВЛ 500 кВ без и с ограничением перенапряжений защитным аппаратом ОПН – ПРН – 500 кВ

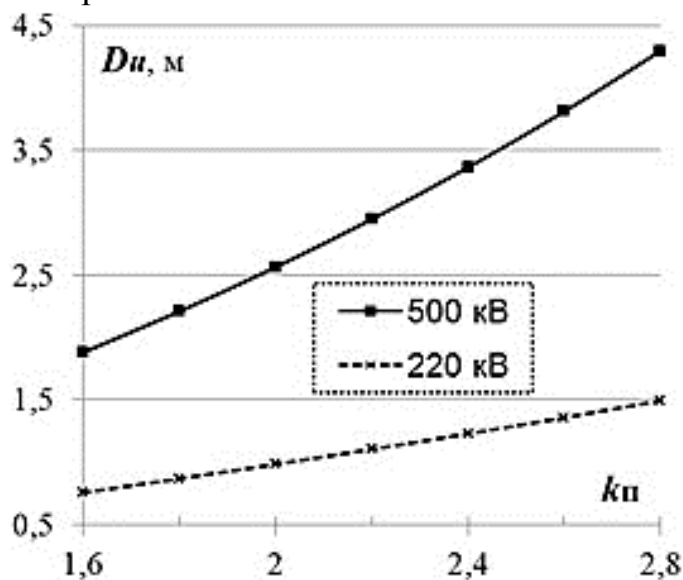


Рисунок 5 –Зависимости «электрической» составляющей минимальных изоляционных расстояний от кратности перенапряжений

защитных аппаратов. Зависимости расстояний  $D_U$  от кратности перенапряжений, приведены на рисунке 5.

– Максимальные неограниченные перенапряжения возникают в середине ВЛ 500 кВ при ОАПВ (рисунок 4, верхняя кривая).

Работа защитного аппарата приводит к ограничению примерно на одном и том же уровне напряжения, которое соответствует моменту пробоя искрового промежутка. Мгновенное значение напряжения  $u_{\text{п}}$  в этот момент равно сумме напряжений на искровом промежутке и ОПН, которые составляют (0.55 – 0.6)  $u_{\text{п}}$  и (0.45 – 0.4)  $u_{\text{п}}$ , соответственно. Эффективность применения защитного аппарата наглядно видна при ОАПВ ВЛ 500 кВ (рисунок 4, нижняя кривая).

– Ток, протекающий через ОПН, имеет колоколообразную форму с амплитудой в несколько сотен ампер и длительностью на полувысоте не более 1 мс, что вполне удовлетворяет условию нормальной работы ОПН выбранного класса энергоёмкости.

Оценка безопасности ПРН выполнялась в предположении равной вероятности расположения мест ПРН и случайных КЗ по длине ВЛ. По этой причине учитывались только максимальные кратности перенапряжений при различном расположении зоны ПРН. Пользуясь полученными результатами, по методике МЭК были проведены оценки возможного сокращения промежутков в зоне ПРН при использовании

Видно, что наибольший эффект от использования защитных аппаратов следует ожидать в классе напряжения 500 кВ. Так, например, «электрическую» составляющую расстояния приближения  $D_U$  можно уменьшить с 4.3 до 2.2 м, ограничивая перенапряжения при коммутациях ОАПВ с уровня 2.8 до 1.8. Для ВЛ 220 кВ эффект от применения защитных аппаратов будет значительно меньше по двум обстоятельствам. Во-первых, невелики перенапряжения, сопровождающие ТАПВ, а во-вторых, удельный вес эргономической составляющей  $D_E$  в общем допустимом расстоянии становится более весомым, чем  $D_U$ .

**Четвёртая глава** посвящена разработке аппаратов для защиты зон ПРН на ВЛ 220 и 500 кВ. Исторически первыми защитными аппаратами зон ПРН были искровые промежутки различной конструкции. Однако, они не имеют перспективы применения для ПРН уже потому, что срабатывание приводит к крайне нежелательному явлению – отключению ВЛ из-за сопровождающего тока дугового замыкания. Кроме того, дуговое замыкание вблизи зоны ПРН чревато серьёзными психологическими воздействиями на членов бригады. Поэтому безальтернативным вариантом в этом случае остаётся применение нелинейных ограничителей перенапряжений – ОПН. В новой редакции стандарта МЭК по минимальным расстояниям приближения отмечено, что «для ограничения повышенных напряжений применение ОПН предпочтительнее, чем использование защитных искровых промежутков, т.к. их срабатывание не вызывает срабатывания устройств РЗА и выключателей». Приведённая цитата появилась по предложению МЭК РНК, которое, в свою очередь, было сформировано по итогам описываемой разработки.

Для защиты зоны ПРН была выбрана конструкция аппарата с внешним искровым промежутком. Критерием выбора служил минимальный вес аппарата. Для обеспечения большей стабильности разрядных характеристик искровой промежутков организован двумя экранами тороидальной формы, смонтированными на стандартном полимерном стержневом изоляторе типа ЛК.

Места расположения тороидов относительно оконцевателей полимерного изолятора выбирались, исходя из допустимой напряжённости электрического поля в стеклопластиковом стержне. Расчёты электрического поля проводились численными методами с применением программы «Elcut». Радиусы образующей и сечения тороидальных электродов,  $R$  и  $r$ , выбирались по условию отсутствия короны при наибольшем рабочем ВЛ. Напряжение начала короны

$$U_H = E_H \cdot r \cdot \left(1 + \frac{r}{2R}\right) \cdot \frac{\ln\left\{\left(\frac{8R}{r}\right) \cdot \left[1 + \frac{r}{2R}\right]\right\} - \left(\frac{\pi R}{2H}\right)}{1 + \left(\frac{r}{2R}\right) \cdot \ln\left\{\left(\frac{8R}{r}\right) \cdot \left[1 + \frac{r}{2R}\right]\right\}}, \quad (7)$$

где  $H$  – высота подвеса тороида над заземлённой плоскостью.

Нижняя граница порога срабатывания защитного аппарата выбиралась из тех же соображений, которые приводились ранее для защитных искровых промежутков, т.е. 270 и 560 кВ<sub>ампл.</sub> для аппаратов 220 и 500 кВ, соответственно. Учитывая, что общее напряжение, приложенное к защитному аппарату, делится между его основными элементами, т.е. искровым промежутком и ОПН выбор указанных величин в качестве нижней границы срабатывания соответствовал выбору с запасом.

В качестве верхней границы срабатывания, исходя из необходимости ПРН на проблемных опорах ВЛ, была выбрана кратность перенапряжения  $1.8 U_{ф.макс.}$  при её положительной полярности. Для надёжного срабатывания защитного аппарата необходимо, чтобы гарантированное напряжение пробоя искрового промежутка,  $U_{50}^{ИП}$ , было меньше той доли коммутационного перенапряжения, которая приходится на искровой промежуток в результате деления напряжения между ним и ОПН.

$$U_{50}^{ИП} + 3\sigma \leq \eta \cdot k_{п} \cdot U_{ф.макс.}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – доля общего напряжения на защитном аппарате, приходящаяся на искровой промежуток;  $k_{п}$  – допустимая кратность перенапряжения, соответствующая принятой вероятности перекрытия изоляционных промежутков в зоне ПРН (степени риска).

При выборе длины искрового промежутка задавались средней величиной среднего разрядного градиента из указанного диапазона  $E_{ср.} = 5$  кВ/см. Рассчитанные длины искровых промежутков приведены в таблице 3.

Таблица 3 – К выбору длины искрового промежутка

Напряжение ВЛ, кВ	$1.8 U_{ф.макс.}$ , кВ	$U_{50\%,ИП} + 3\sigma$ , кВ	$U_{50\%,ИП}$ , кВ	$d$ , м
220	355.7	249	216.5	0.54
500	808.3	582	506	1.01

Долю напряжения, приходящуюся на искровой промежуток определяли, считая, что распределение напряжения по элементам защитного аппарата определяется геометрическими ёмкостями между их электродами. Приближённую оценку ёмкости между электродами искрового промежутка проводили по выражению

$$C_{ИП}^{220} \approx \frac{4\pi^2 \varepsilon R}{\ln\left(\frac{8R}{r}\right) - \frac{R}{\sqrt{R^2+h^2}}} \cdot \mathbf{K}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{K}$  – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем  $k^2 = R^2 / (R^2 + h^2)$ ;  $2h$  – расстояние между осями тороидов, близкое к выбранной длине искрового промежутка.

Расчётные величины ёмкостей между электродами искровых промежутков составили  $C_{ИП}^{220} \approx 14.2$  пФ и  $C_{ИП}^{500} \approx 14.2$  пФ. Реальные значения межэлектродных ёмкостей будут, по-видимому, немного больше вычисленных значений, поскольку электроды соединены с арматурой для крепления к фланцам, а она также имеет свою ёмкость.

Ёмкость между фланцами модуля ОПН оценивалась суммой двух составляющих, геометрической ёмкостью между электродами с учётом влияния их крепёжной арматуры и ёмкостью столба последовательно соединённых варисторов,  $C_{вар}$ ,

$$C_{ОПН} = C_{г} + C_{вар}. \quad (10)$$

Приближённую оценку геометрической ёмкости провели, заменяя нижний электрод искрового промежутка, соединительную арматуру и верхний фланец ОПН общей геометрической фигурой в виде цилиндра с эквивалентным радиуса  $R$  и высотой  $2h$  как

$$C_{г} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \left\{ \arctg\left(\frac{h}{R}\right) + \frac{h}{2R} \ln \left[ 1 + \left(\frac{R}{h}\right)^2 \right] \right\}. \quad (11)$$

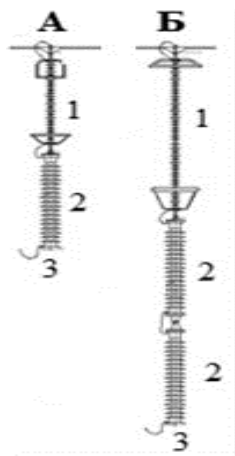


Рисунок 6 - ОПН-ПРН 220 и 500 кВ: 1 – искровой промежутки; 2 – ОПН; 3 – шлейф заземления

Подставляя в (11) численные значения параметров  $R = 0.15$  м и  $h = 0.4$  м, получили  $C_r = 21$  пФ и 31.1 пФ для аппаратов 220 и 500 кВ, соответственно.

Ёмкость варисторов типа E48kV612E, ёмкостью 360 пФ каждый, определялась их количеством в столбе:  $C_{вар} = 12$  и 4,7 пФ для аппаратов 220 и 500 кВ, соответственно. Тогда по (10) получили  $C_{ОПН}^{220} = 33$  пФ и  $C_{ОПН}^{500} = 36$  пФ.

На основе этих данных были выполнены численные оценки коэффициента  $\eta \approx 0.7$  и 0.72 для аппаратов 220 и 500 кВ.

Эскизы опытных образцов защитных аппаратов приведены на рисунке 6.

Основные требуемые технические характеристики защитных аппаратов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики защитных аппаратов

Основные характеристики	Тип защитного аппарата	
	ОПН-ПРН-220/150-10/650(II)	ОПН-ПРН-500/375-10/650(II)
<i>Модуль ОПН</i>		
Номинальное напряжение, кВ <sub>эфф.</sub>	150	375
Классификационное напряжение, кВ <sub>эфф.</sub>	142	355
Остающееся на ОПН напряжение, кВ, при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой	250 А	630
	500 А	650
	1000 А	670
Остающееся на ОПН напряжение, кВ, при импульсе тока 10 кА с формой 1/10 мкс	370	925
Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса тока 4/10 мкс, кА	100	
Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса тока, А	650	
Энергия одиночного импульса пропускной способности, не менее, кДж	360	900
Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150	УХЛ1	
Масса, кг, не более	35	75
<i>Искровой промежутки</i>		
$U_{50\%}$ частоты 50 Гц, кВ, не менее	191	396
$U_{50\%}$ коммутационного импульса положительной полярности, кВ, не более	435	870

Высоковольтные испытания опытных образцов защитных аппаратов ОПН – ПРН классов напряжения были проведены в испытательном центре высоковольтного оборудования ФГУП ВЭИ (г. Москва).

Результаты испытаний аппаратов 220 и 500 кВ сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Разрядные характеристики защитных аппаратов ОПН-ПРН

Класс напряжения ОПН-ПРН, кВ	Длина ИП, м	Вид испытательного напряжения					
		Переменное			Коммутационный импульс		
		$U_{\sim 50\%}$ , кВ <sub>эфф</sub>	$\sigma$ , %	$E_{\sim}$ , кВ <sub>М</sub> /см	$U_{50\%,ки}$ , кВ (+)	$\sigma$ , % (+)	$E_{50\%,ки}$ , кВ/см
220	0.54	240	$\leq 1$	6.32	444	2.8	8.27
500	0.94	408	3.5	6.14	871	4.0	9.26

Если говорить о разрядных градиентах  $E_{\sim}$ , то их изменение при варьировании длины искрового промежутка (ИП) в аппаратах 220 и 500 кВ, по-видимому, связано с изменением степени неоднородности электрического поля. Более сложная ситуация возникла с анализом значений импульсных разрядных градиентов,  $E_{50\%ки}$ . Их величины оказались непривычно большими и, к тому же, имели большой разброс. Возможно, это объяснялось тем, что при испытаниях переменным напряжением испытывался непосредственно искровой промежуток, а ОПН закорачивался, в то время как при испытаниях коммутационными импульсами подвергалась вся конструкция, и на искровой промежуток приходилась лишь часть приложенного к конструкции напряжения, о чём уже говорилось выше.

Можно, однако, провести приближённую оценку распределения напряжения вдоль конструкции при воздействии коммутационных импульсов. Для этого примем, что в диапазоне изоляционных расстояний от 0.5 до 1.0 м, пробой искрового промежутка при воздействии коммутационных импульсов, осуществляется исключительно в стримерной форме, т.е. длина лидера в начале сквозной фазы равна нулю. Обычно в реальных изоляционных конструкций средние разрядные градиенты составляют 5 кВ/см и более. В наших испытаниях переменным напряжением, средний разрядный градиент составил  $E_{\sim} = 6.32$  кВ<sub>М</sub>/см. При испытаниях коммутационным импульсом, с длительностью фронта меньше четверти полупериода переменного напряжения, можно ожидать меньшего значения разрядного градиента.

Примем также, что напряжение  $U_{50\%,ки}$  всей конструкции будет складываться из  $U_{50\%,ИП}$  и остающегося напряжения на ОПН  $U_{ост.}$  (напряжения после пробоя ИП), т.е.

$$U_{50\%,к.и.} = U_{50\%,ИП} + U_{ост.}, \text{ кВ.} \quad (12)$$

На самом деле непосредственно перед пробоем ИП напряжение на ОПН может немного отличаться от  $U_{ост.}$ . Из полученных при испытаниях осциллограмм напряжения имеем  $U_{ост.} = 210$  и  $430$  кВ для ОПН – ПРН 220 и 500 кВ, соответственно. С учётом этих данных, в таблице 6 приведены опытные данные и результаты расчётов по (12) при предположении, что средний разрядный градиент в искровом промежутке аппарата 220 кВ составлял 5 кВ/см.



Таблица 6– Сравнение опытных и расчётных разрядных напряжений

Характеристики	Класс напряжения, кВ	
	220	500
$S$ , см	54	94
$U_{50\%, \text{ ип}}$	270	470
$U_{\text{ост.}}$ , кВ	210	430
Расчётная величина $U_{50\%, \text{ к.и.}}$ , кВ	480	900
Измеренная величина $U_{50\%, \text{ к.и.}}$ , кВ	444	870
Расхождение между расчётом и опытом, %	+8.1	+3.4
$U_{50\%, \text{ ип}} / U_{50\%, \text{ ки}}$ , расчёт	0.56	0.52
$U_{50\%, \text{ ип}} / U_{50\%, \text{ ки}}$ , ОПЫТ	0.61	0.54

Из приведённых в таблице 6 данных видно, что расчётные отношения  $U_{50\%, \text{ ип}} / U_{50\%, \text{ ки}}$  довольно близки к экспериментальным величинам. Этот факт означает, что различие в величинах ёмкостей искрового промежутка и «закрытого» ОПН, по-видимому, меньше, чем было принято в начале разработки.

Впрочем, принципиального значения погрешность выполненных оценок ёмкостей не имеет. Главное, чтобы общее коммутационное импульсное напряжение, приложенное к защитному аппарату, делилось между искровым промежутком и ОПН и делилось так, чтобы около (60 – 70) % было бы приложено к искровому промежутку. Более полно ход и итоги разработки защитных аппаратов автор представил в приведённых ниже публикациях.

При выборе места установки защитного аппарата наиболее безопасным решением оказалось размещение защитного аппарата в центральной части пролёта ВЛ. В свою очередь, это решение можно реализовать в трёх вариантах. За основу проекта технологической карты, изложенной в приложении Г, был выбран вариант, в котором к проводу поднимается весь аппарат, а его заземление осуществляется гибким шлейфом.

**В пятой главе** проведена оценка экономической эффективности производства ремонтных работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи, а также выделен ряд следующих технических достоинств ПРН

1. Отсутствие дополнительного расхода электрической энергии на её транспорт в случае работы электрической сети в неоптимальных ремонтных режимах при отключении ВЛ, требующей ремонта.

2. Снижение количества коммутаций позволяет уменьшить уровень рисков возникновения инцидентов и аварий в электрических сетях.

3. Снижение затрат, связанных с компенсацией ущерба сельскохозяйственному производству и собственникам земель, по которым проходит ремонтируемая ВЛ, за счёт оптимизации сроков выполнения работ.

4. Возможность оптимальной загрузки ремонтных бригад выполняющих ПРН. Оптимизация долгосрочных графиков работ и минимизация времени вынужденных простоев бригад достигается за счёт меньшей зависимости согласованного периода проведения ремонта от режимов работы энергосистемы.

5. Применение ПРН, как более технологичного вида работ в электроустановках, содействует повышению квалификации исполнителей, содействует развитию передовых технологий, повышению эффективности и безопасности их труда.

Основное преимущество работ под напряжением заключается в том, что оборудование находится в работе во время ремонта, следовательно, улучшается качество электроснабжения потребителей. Помимо экономических интересов рынка электроэнергии, очевиден положительный эффект ПРН и в социальном плане: бесперебойность электроснабжения оказывает влияние на уровень общественного благополучия.

Согласно выводам МЭК эффективность ПРН возрастает с увеличением класса напряжения, причём на воздушных линиях она значительно выше, чем на электроподстанциях. Предполагается, что в будущем будет возрастать удельный вес ПРН и в сетях средних классов напряжения, в том числе из-за распространения систем распределённой генерации.

В отечественной практике экономическая эффективность ПРН определялась исключительно снижением потерь энергии, которые могут возникнуть при отключении какой-то ВЛ и питании потребителей по другим, менее оптимальным, путям транспорта энергии. В зарубежной практике, наряду с указанным фактором, в расчёты эффективности включается экономия затрат времени на подготовку работ; получение допуска от энергосистемы; на отключение и повторное включение в случае проведения работ на выведенном из работы оборудовании; собственно на работу. На примере ПРН по замене распорок на двух ВЛ длиной 100 км показано, что суммарные затраты в случае производства работ на отключенной ВЛ, остаются выше на 9,3%, чем при ПРН.

Наряду с таким «системным» фактором экономической эффективности ПРН, как отсутствие дополнительных потерь электроэнергии при её транспортировке по «ремонтной схеме» электрической сети в случае отключения ремонтируемой ВЛ, автор предложил учитывать ещё одну составляющую экономического эффекта от ПРН, которая не присутствовала в предшествующих оценках экономической эффективности. Речь идёт о ситуации, когда при выводе в ремонт системообразующих ВЛ, возникает необходимость покрытия недостающих мощностей в энергодефицитном районе за счёт загрузки менее эффективных «замыкающих» генерирующих источников, и наоборот, разгрузки более экономичных энергоблоков в узлах с запёртой мощностью. Подобная ситуация достаточно типична. Рассмотрение её дано на примере отключения одной или двух ВЛ 220 кВ, которые связывают дефицитный Бийский энергоузел энергосистемы Алтайского края и Республики Алтай с Барнаульской зоной. Показано, что снижение цены электроэнергии, вырабатываемой Бийской ТЭЦ, в случае отсутствия необходимости присвоения ей признака «электростанция (генерирующий объект), поставляющая электрическую энергию в вынужденном режиме», может составить порядка 20 %.

Таким образом, внедрение ПРН снижает вероятность возникновения недопустимого снижения пропускной способности электрических сетей и работы электростанций «в вынужденном режиме». Это обстоятельство является экономическим фактором, потенциально стимулирующим развитие технологий ПРН.

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Из анализа практического опыта следует, что производство ремонтных работ под напряжением осуществляется преимущественно на воздушных линиях электропередачи, а в российской технологии доставки электромонтёра к проводу доминирует метод «маятника».

2. Оценку напряжения перекрытия изоляционных промежутков можно произво-

дить расчётом по эмпирическим зависимостям прочности от длины промежутка и длительности фронта волны, но с обязательным учётом корректирующих коэффициентов, в том числе коэффициента, учитывающего влияние соседних фазных проводов на электрическую прочность рассматриваемой системы изоляционных промежутков в зоне проведения работ.

3. Для оценки вероятности перекрытия и степени риска верхового электромонтёра расчёты необходимо проводить четыре раза, т.е. для двух длительностей фронта и двух длин промежутков: проектной длины и промежутков, меньшей длины, скорректированной от проектной длины в меньшую сторону за счёт введения при ремонтах оснастки и приспособлений, включая монтерский стул и электромонтёра.

4. Полученные при моделировании переходных процессов в программе ЕМТР данные можно использовать для оценки кратности перенапряжений при коммутациях ВЛ 220 и 500 кВ. В расчётах установлено, что:

– перенапряжения, возникающие на ремонтируемой фазе линии при случайных коротких замыканиях на здоровых фазах, не представляют опасности и потому не требуют ограничения амплитуды;

– невысокие перенапряжения имеют место и при трёхфазном автоматическом повторном включении ВЛ 220 кВ;

– наибольшие кратности перенапряжений возникают при однофазном автоматическом повторном включении ВЛ 500 кВ и расположении зоны ПРН в средних частях линии. Именно в этих случаях эффективность применения защитных аппаратов в части сокращения требуемых изоляционных промежутков зоны ПРН особенно высока.

5. Разработаны и переданы фирме-изготовителю основные технические требования к защитным аппаратам ОПН-ПРН для ограничения опасных коммутационных перенапряжений при работах на ВЛ 220 и 500 кВ. Проведены высоковольтные испытания опытных образцов защитных аппаратов ОПН – ПРН, в которых правильность выбора размеров искровых промежутков защитных аппаратов была подтверждена.

6. Рассмотрены основные требования к выбору места установки защитного аппарата на ремонтируемой ВЛ и разработан проект технологической карты на этот вид работы.

7. В оценке экономического эффекта ПРН предложено учитывать составляющую, связанную с вынужденными отклонениями от оптимального режима генерирующих источников, к которым прибегают при отключениях линий.

### **Список научных трудов по теме диссертации**

#### ***Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК***

1. **Казакова, С.А.** Расчёт напряжения перекрытия изоляционных промежутков в зоне ремонтных работ под напряжением/ С.А Казакова, А.Г. Овсянников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1-2. – С. 334 – 338.
2. **Казакова, С.А.** Защита зоны ремонтных работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения / С.А Казакова, Т.Т. Каверзнева, А.Г. Овсянников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 65 – 71.
3. **Kazakova, S.A.** The Use of Line Surge Arresters to Provide Safety of Live Working // Applied Mechanics and Materials, Vol. 698 (Dec. 2014). – pp. 738 – 742.

4. **Казакова, С.А.** Эффективность производства ремонтных работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи / С.А. Казакова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 71 – 73.

*Статьи, опубликованные в российских изданиях; материалы международных и всероссийских конференций*

5. **Казакова, С.А.** Характеристики перенапряжений при коротких замыканиях и повторных включениях ВЛ 220 и 500 кВ / С.А. Казакова [и др.] / Сб. докладов 7-го семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок, Хабаровск, апрель 2012. – Новосибирск: СибПринт. – 2012. – С. 203 – 210.
6. **Казакова, С.А.** Характеристики перенапряжений при коротких замыканиях и повторных включениях ВЛ 220 и 500 кВ / С.А. Казакова [и др.] // Линии электропередачи 2012: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы пятой Российской науч.-практ. конф. с междунар. участ., Новосибирск, 11-13 сентября 2012 г. – Новосибирск: ЭЛСИ. – 2012. – С. 203 – 210.
7. **Казакова, С.А.** Применение ОПН для обеспечения безопасности работ под напряжением / Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды международной н.-тех. конф.: сборник статей. В 3 т. – Самара: СамГТУ, 2011. Т.3. – С. 41 – 45.
8. **Казакова, С.А.** Характеристики подвесных ограничителей перенапряжений для обеспечения безопасности ремонтных работ под напряжением на ВЛ 220, 330 и 500 кВ / С.А. Казакова, Е.Н. Фролкин / Сб. докладов 7-го семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок, Хабаровск, апрель 2012. – С. 159 – 164.
9. **Казакова, С.А.** Характеристики подвесных ограничителей перенапряжений для обеспечения безопасности ремонтных работ под напряжением на ВЛ 220, 330 и 500 кВ / С.А. Казакова, Е.Н. Фролкин // Линии электропередачи 2012: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы пятой Российской науч.-практ. конф. с междунар. участ., Новосибирск, 11-13 сентября 2012 г. – Новосибирск. – 2012. – С. 159 – 164.
10. **Kazakova, S.** The Use of Line Surge Arresters to Provide Safety of Live Working / Proc. of 18<sup>th</sup> ISH, Seoul, 25-30 August 2013. - [Электронный ресурс]. – Paper OG 2 – 02. – С. 2236 – 2238 / Book of abstracts. – С. 498.
11. **Казакова, С.А.** Использование линейных разрядников для обеспечения безопасности при проведении работ под напряжением / Сб. науч. трудов I междунар. науч. конф. молодых учёных "Электротехника. Энергетика. Машиностроение". – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2014. – Ч. 2. – С. 145 – 148.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ 1115. Подписано в печать 02.07.2018 г.