

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу  
Казаковой Светланы Алексеевны «Исследование коммутационных перенапряжений и разработка защитных аппаратов для ремонтных работ под напряжением», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Проблемам повышения надежности работы энергосистем и бесперебойному снабжению электроэнергией потребителей уделяется неослабное внимание, как в нашей стране, так и за рубежом. Одним из эффективных способов решения этих проблем является производство ремонтных работ под напряжением (ПРН) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) высокого и сверхвысокого напряжения. Для ПРН необходимыми условиями являются: наличие безопасных технологий, специальная профессиональная подготовка ремонтного персонала, защита его от воздействия электромагнитных полей и обеспечение электробезопасности верховых электромонтеров. Последнее, чрезвычайно важное требование связано с определением минимально допустимых расстояний в зоне ПРН, в которой должны быть исключены перекрытия при воздействии случайных коммутационных перенапряжений. Очевидно, что ограничение этих перенапряжений за счет специальных защитных аппаратов будет способствовать повышению уровня электробезопасности ремонтного персонала.

С учетом сказанного, **актуальность темы** диссертации Казаковой С.А. не вызывает сомнений.

Рецензируемая работа общим объемом 167 стр. машинописного текста (с 62 рисунками и 27 таблицами) состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и шести приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены новые научные положения, выносимые на защиту, и отражена практическая значимость работы.

**В первой главе** выполнен обзор существующих технологий производства ремонтных работ под напряжением. Отражены виды вредных воздействий на человека при ПРН и методы защиты от них. Проведен анализ проблем обеспечения электробезопасности персонала, работающего на потенциале провода ВЛ. Показано, что решение этих проблем осуществляется на основе рекомендаций, существующих в отечественной, зарубежной и международной практике нормативных документов, путем выбора минимально допустимых изоляционных расстояний между потенциальными и заземленными элементами ремонтной схемы. В свою очередь, выбор этих расстояний базируется на знании параметров возможных коммутационных перенапряжений и электрической прочности изоляционных конструкций ВЛ при этих воздействиях.

Критический анализ методов определения минимально допустимых изоляционных расстояний позволил автору выявить достоинства и недостатки существующих нормативных документов, при оценке электробезопасности ПРН обоснованно показать достаточность учета лишь коммутационных перенапряжений, возникающих при случайных коротких замыканиях на соседних фазах и, в особых случаях – при перенапряжениях, появляющихся при автоматических повторных включениях ВЛ.

С целью повышения степени электробезопасности ПРН **принципиально новым** является предложение автора ограничивать коммутационные перенапряжения с помощью специальных защитных аппаратов на базе нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

В теоретическом плане наиболее значимыми представляются результаты исследований, приведенные во второй и третьей главах работы.

**Вторая глава** посвящена развитию метода расчета электрической прочности изоляционных промежутков в зоне ПРН. Взяв за основу основные положения Публикации МЭК 61472, автором выполнена расчетная оценка электрической прочности изоляционной системы «провод-стойка опоры» при воздействии на нее коммутационных импульсов положительной полярности с длительностью фронта 1000 мкс. При этом отмечено хорошее соответствие результатов расчета с известными экспериментальными данными, полученными при испытаниях изоляции коммутационными импульсами положительной полярности с длительностью фронта 700 и 1500 мкс.

С целью совершенствования метода расчета изоляционных расстояний по Публикации МЭК 61472 была проведена оценка влияния ширины грани опоры, а также конфигурации промежутков в зоне ПРН на их электрическую прочность. Результаты выполненных исследований позволили сделать **важный вывод** о том, что, хотя увеличение числа элементов опоры и приводит к снижению 50%-ного разрядного напряжения изоляции, однако, вследствие уменьшения значения стандартного отклонения, выдерживаемые напряжения на уровне  $-3\sigma$  остаются практически неизменными.

Ко второму **новому научному положению** следует отнести оригинальный способ построения так называемых эквивалентных кривых, соответствующих неизменной электрической прочности воздушных промежутков между проводом и элементами опоры в координатах геометрии тела опоры, что оказывается весьма полезным при оценке безопасности ПРН.

В качестве следующего **нового научного положения**, способствующего совершенствованию метода расчета Публикации МЭК 61472, особо следует отметить результаты теоретических исследований по влиянию соседних фаз на электрическую прочность промежутков в зоне ПРН. Показано, что в зоне ПРН у опоры за счет ее экранирующего действия это влияние относительно невелико и усиливается по мере удаления от опоры. При ПРН в середине пролета наиболее сильное и весьма существенное влияние соседних фаз сказывается на электрической прочности промежутка между тележкой электромонтера и расположенными на земле объектами (деревьями, транспортом). Хотя при подготовке к ПРН все наземные объекты под



пролетом должны быть удалены, однако на практике в силу пресловутого «человеческого фактора» такую ситуацию нельзя исключить.

Расчеты электрической прочности изоляционных промежутков рекомендовано проводить с учетом поправочных коэффициентов: на длительность фронта коммутационных перенапряжений, особенности конструкции и размеры опоры, а также на взаимное расположение зоны ПРН и проводов ВЛ. Для оценки степени риска расчетные оценки следует выполнять для двух значений длительности фронта воздействующего напряжения и двух длин промежутков: проектной и сокращенной длины, скорректированной за счет введения при ПРН оснастки и приспособлений, включая монтерский стул и самого монтера.

**Третья глава** содержит большой объем теоретических исследований перенапряжений на ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения. Применительно к ПРН среди возможных перенапряжений обоснованно выбираются воздействия, возникающие при однофазных коротких замыканиях на землю (КЗ) на средней и крайней фазах в различных точках ВЛ, а также перенапряжения, вызванные действием АПВ: трехфазным (ТАПВ) для ВЛ 220 кВ и однофазным (ОАПВ) для ВЛ 500 кВ. В качестве характеристик перенапряжений, влияющих на электрическую прочность воздушной изоляции, рассматриваются кратность перенапряжений и длительность их фронта. Основным программным обеспечением служил пакет АТР-ЕМТР. При расчетах перенапряжений при АПВ учитывалось наличие остающихся зарядов на здоровых фазах ВЛ.

Выполненные исследования позволили получить следующие **наиболее важные научные результаты**:

- при однофазных КЗ на землю кратность перенапряжений на здоровых фазах для ВЛ 220 и 500 кВ не превышала соответственно 1,8 и 1,7. Такие относительно низкие уровни перенапряжений не требуют применения специальных защитных аппаратов;

- если за время бестоковой паузы происходит полное стекание зарядов, то возникающие при ТАПВ ВЛ 220 кВ перенапряжения оказываются относительно небольшими. В противном случае, кратность перенапряжений может достигать 2,6.

- наиболее высокие кратности перенапряжений (до 2,8 в середине пролета ВЛ) появляются при ОАПВ ВЛ 500 кВ. Эффективным способом ограничения этих перенапряжений (до 1,85) является использование специальных защитных аппаратов на основе нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). В частности, применение ОПН на ВЛ 500 кВ позволяет снизить кратность перенапряжений при ОАПВ с 2,8 до 1,8, сократив тем самым «электрическую» составляющую расстояния приближения с 4,3 до 2,2 м. Очевидно, что такие способы защиты от перенапряжений приобретают наиболее важное значение в случаях проблемных опор ВЛ сверхвысокого напряжения, когда в зоне ПРН изоляционные промежутки оказываются меньше допустимых по нормативным документам или расчетным оценкам.

- для ВЛ 220 и 500 кВ определены расчетные вероятности распределения длительности фронта коммутационных перенапряжений  $F = \Psi(T_{\phi})$  при коротких замыканиях на землю и автоматических повторных включениях.

**В четвертой главе** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке ограничителей перенапряжений для защиты зон ПРН на ВЛ 220 и 500 кВ. Анализируя традиционные средства защиты (защитные искровые промежутки (ЗИП) и обычные ОПН), автор указывает на их существенные недостатки. Делается обоснованный вывод о целесообразности применения при ПРН специального защитного аппарата, состоящего из последовательного соединения искрового воздушного промежутка (ЗИП) и ОПН (ОПН-ПРН). До срабатывания ЗИП напряжение на аппарате распределяется между искровым промежутком и ОПН, на который приходится меньшая доля от всего приложенного напряжения.

Выбор диапазона изменения разрядных напряжений осуществлялся из следующих соображений. Для исключения излишне частых срабатываний ЗИП при относительно небольших кратностях перенапряжений и случайных колебаниях напряжения промышленной частоты нижний предел выдерживаемого напряжения ЗИП принимался равным  $1,3U_{н.раб.ф.}$ , а уровень ограничения перенапряжений -  $1,8U_{н.раб.ф.}$

С помощью емкостной схемы замещения ОПН-ПРН рассчитывалось распределение напряжения по элементам аппаратов (ЗИП и ОПН). Далее, принимая расчетные значения средних разрядных градиентов в ЗИП, равные 5 кВ/см, определялись длины ЗИП с последующей их корректировкой по результатам испытаний опытных образцов ОПН-ПРН-220 кВ и ОПН-ПРН-500 кВ.

Результаты выполненных исследований позволили разработать и передать фирме изготовителю основные технические требования к подвесным защитным аппаратам ОПН-ПРН для ограничения опасных коммутационных перенапряжений на ВЛ 220 и 500 кВ. Дальнейшие высоковольтные испытания ОПН-ПРН-220 кВ и ОПН-ПРН-500 кВ в целом подтвердили правильность принятых конструктивных решений.

В плане наиболее приемлемого варианта места установки защитных аппаратов принято размещать их в середине пролета ВЛ с подвеской ОПН-ПРН непосредственно к проводу. Именно этот вариант был положен в основу разработанного проекта технологической карты ПРН.

Отраженные в данной главе результаты исследований представляют несомненную **практическую значимость**.

В заключительной **пятой главе** рассмотрены вопросы, связанные с оценкой эффективности ПРН на ВЛ. Отмечается, что в отечественной практике экономическая эффективность ПРН связывалась исключительно с потерями электроэнергии, которые могут возникнуть при отключении определенной ВЛ и питании потребителей по менее оптимальным путям транспортировки электроэнергии. За рубежом в расчеты эффективности ПРН добавляется экономия временных затрат на подготовку работ, получение



допуска от энергосистемы, на отключение и повторное включение в случае проведения работ на выведенном из работы оборудовании и на саму работу.

Помимо известных преимуществ ПРН автор предлагает учитывать **новый**, ранее не отмечавшийся фактор их экономической эффективности. Этот фактор, имеющий **практическую значимость**, связан с типичной ситуацией, когда при выводе в ремонт системообразующих ВЛ возникает необходимость покрытия недостающих мощностей в дефицитном энергорайоне за счет загрузки менее эффективных «замыкающих» генерирующих источников и, наоборот, разгрузки более экономичных энергоблоков в узлах с запертой мощностью. В качестве примера рассмотрено отключение одной или двух ВЛ 220 кВ, связывающих дефицитный Бийский энергоузел энергосистемы Алтайского края и республики Алтай с Барнаульской зоной. Показано, что при отсутствии присвоения Бийской ТЭЦ признака «электростанция, поставляющая электроэнергию в вынужденном режиме» снижение цены на вырабатываемую ТЭЦ электроэнергию может составить 20%.

В целом диссертация С.А.Казаковой выполнена на достаточно высоком научном уровне. Рецензируемая работа выгодно отличается от многих других кандидатских диссертаций, появившихся в последнее время, поскольку в ней использован комплексный подход, включающий как теоретические изыскания, так и экспериментальную часть, подтверждающую основные научные положения и выводы.

Достоверность результатов исследований подтверждается соответствием результатов расчетов с опытными данными, применением при стандартных методах проведения высоковольтных испытаний сертифицированного испытательного и измерительного оборудования, корректным использованием схем замещения ВЛ.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается данными лабораторных испытаний разработанных и изготовленных опытных образцов защитных аппаратов ОПН-ПРН-220 кВ и ОПН-ПРН-500 кВ.

Основные результаты работы отражены в 11 научных трудах, в том числе в 4-х статьях периодических изданий по перечню ВАК и одном докладе на международном симпозиуме по высоковольтной технике.

Лично соискателю принадлежит постановка и решение научно-исследовательских задач, ключевые теоретические положения, выводы и рекомендации, вынесенные на защиту. Личный вклад в работы, опубликованные в соавторстве, составляет не менее 50%.

Опытные образцы защитных аппаратов ОПН-ПРН 220 и 500 кВ переданы в опытно-промышленную эксплуатацию в ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС». Рекомендации по применению ОПН-ПРН 220 и 500 кВ внедрены в МЭС Сибири и могут быть использованы остальными МЭС страны.

Диссертация написана доходчиво, хорошо оформлена, содержит множество иллюстративного материала в виде графиков, рисунков и таблиц.

Содержание автореферата полностью соответствует положениям, идеям и выводам, изложенным в диссертации.

По работе имеется ряд замечаний общего и частного характера.

Замечания общего характера.

1. Во второй главе рассмотрены вопросы электрической прочности воздушных промежутков при коммутационных воздействиях положительной полярности в зоне ПРН. Третья глава посвящена исследованию коммутационных перенапряжений на ВЛ 220 и 500 кВ. Логичнее было бы переставить главы местами: во второй главе на основе анализа результатов расчетов выбрать необходимую длительность фронта перенапряжений, а в третьей главе использовать эту длительность фронта для оценки электрической прочности воздушной изоляции.

2. При определении длительности фронта коммутационных перенапряжений следует пользоваться рекомендациями отечественных и международных нормативных документов (ГОСТ Р 55194 и МЭК 60060-1), а не придумывать что-то довольно сомнительное. Дело в том, что промежуток времени на фронте импульса между нулевым значением времени и значением, соответствующим напряжению появления короны, при колебательных воздействиях заметно больше, чем при апериодических. В результате при стандартном определении  $T_{\text{ф}}$  одинаковая электрическая прочность промежутков достигается в случае, если при колебательном импульсе  $T_{\text{ф.кол}}$  оказывается существенно больше  $T_{\text{ф.апер}}$  при апериодической форме напряжения. В частности в работах ВЭИ показано, что при колебательных импульсах положительной полярности критическая длительность фронта импульса примерно в два раза больше, чем при апериодических воздействиях.

3. Следует более четко различать две разные по физическому смыслу вероятностные характеристики и более корректно оперировать с принятыми для них понятиями и терминологией. На стр. 51 работы речь идет о параметрах случайного события, поэтому вместо фразы «**Среднеквадратичные отклонения** разрядных напряжений можно принять равными  $\sigma = 5\% \dots$ » следует писать «**Стандартные отклонения** можно принять равными  $\sigma = 5\% \dots$ ».

К числу досадных огрехов частного характера относятся.

1. На стр. 49 говорится, что кривая 3 рис. 2.2 построена по формуле (1.8) для промежутка ст-пл при  $T_{\text{ф.кр}}$ .

$$U_{50\text{с-пл}} = 1080 \text{Ln}(0,46S + 1) \quad (1.8)$$

На самом деле кривая 3 рис. 2.2 построена по формуле

$$U_{50\text{нр-опора}} = 1,2U_{50\text{с-пл}} = 1,2 \cdot 1080 \text{Ln}(0,46S + 1)$$

2. На стр. 50 говорится, что на рис. 2.3 приведены экспериментальные данные, отмеченные крестиками. На самом деле экспериментальные данные относятся к кривой 1 рис. 2.2.



3. В подписях к рис. 2.5 (стр. 54) и рис. 2.6 (стр. 55) не указана форма и длительность фронта коммутационного импульса.

4. На стр. 81 говорится, что зависимость напряжения перекрытия воздушного промежутка «провод-стойка опоры» от **длительности фронта** определяется выражением (2.2). На самом деле выражение (2.2) определяет зависимость 50%-ного разрядного напряжения воздушного промежутка «провод-стойка опоры» от **длины** этого промежутка при импульсах положительной полярности с критической длительностью фронта.

5. В табл. 4.4 на стр. 98 значения  $U_{50}$  при коммутационном импульсе (435 кВ для ОПН-ПРН 220 кВ и 870 кВ – для ОПН-ПРН 500 кВ) должны относиться ко всему аппарату, а не к искровому промежутку.

Указанные недостатки не снижают ценность решений задач, поставленных перед автором. Представленную диссертацию можно квалифицировать как законченную научную работу, в которой на основе совокупности полученных теоретических положений и экспериментальных результатов решена важная научно-техническая задача по разработке специальных защитных аппаратов для проведения работ под напряжением на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. Результаты работы имеют существенное значение для развития страны за счет обеспечения более высокого уровня электробезопасности персонала при ПРН и повышения надежности работы энергосистем.

Диссертационная работа С.А.Казаковой «Исследование коммутационных перенапряжений и разработка защитных аппаратов для ремонтных работ под напряжением» соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.12 –Техника высоких напряжений.

Официальный оппонент  
доктор технических наук,  
Главный научный сотрудник  
ВЭИ - филиал ФГУП «РФЯЦ  
ВНИИТФ имени академика  
Е.И.Забабахина»

 А.Р.Корявин

Подпись А.Р.Корявина  
заверяю:  
Заместитель директора РФЯЦ ВНИИТФ  
Директор ВЭИ, к.т.н.

 А.Ю.Петров

*Отзыв получен*  
*24.09.2018* *М.Руссеев*  
*С отзывом ознакомлена* 7  
*27.09.2018* *Казакова С.А.*