

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

На правах рукописи

Дмитриев Михаил Викторович

Методика выбора ОПН для защиты оборудования сетей 110 – 750 кВ  
от грозových и внутренних перенапряжений

специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические  
системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Доктор технических наук  
профессор Евдокунин Г.А.

Санкт-Петербург – 2006

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ГРОВОЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ОБОРУДОВАНИИ ПС И ЗАЩИТА ОТ НИХ	8
1.1. Описание расчетной модели	11
1.1.1. Модель открытого распределительного устройства	11
1.1.2. Модель присоединенных к ОРУ воздушных линий	12
1.1.3. Моделирование импульса тока молнии	17
1.1.4. Статистический метод, используемый для анализа грозовых перенапряжений на оборудовании	18
1.2. Расчет грозовых перенапряжений на подстанции	21
1.2.1. Расчет допустимых расстояний от оборудования до защитных аппаратов в зависимости от их типа	21
1.2.2. Расчет необходимой длины тросового подхода ВЛ	33
1.2.3. Каскадные схемы защиты оборудования и их эффективность	36
1.2.4. Учет обратных перекрытий на присоединенных ВЛ	39
1.2.5. Оценка числа лет безаварийной работы оборудования подстанции при грозовых перенапряжениях	42
1.3. Анализ нормативных документов и предложения по их корректировке	45
1.3.1. Анализ требований ПУЭ в части грозозащиты подстанций	45
1.3.2. Предложения по корректировке ПУЭ	48
1.4. Расчет импульсных токов и выделяющихся энергий при грозовых перенапряжениях	50
1.4.1. Расчет амплитуды импульсного тока в ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений	50
1.4.2. Расчет выделяющихся в ОПН энергий в режиме ограничения грозовых перенапряжений	57

2.	КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 110-750 кВ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН	64
2.1.	Ограничение коммутационных перенапряжений в сетях 110-750 кВ	68
2.2.	Расчет импульсных токов и выделяющихся энергий при коммутационных перенапряжениях	77
2.3.	Методические подходы к расчету коммутационных перенапряжений	89
2.3.1.	Методика расчета коммутационных перенапряжений	90
2.3.2.	Ток или энергия?	92
2.3.3.	Выбор ОПН на основе расчетов коммутационных перенапряжений	93
2.3.4.	Пример расчета коммутационных перенапряжений	95
3.	ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА НЕЙТРАЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110-220 кВ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН-Н	103
3.1.	Уравнения и схемы замещения трансформатора	105
3.2.	Напряжение на разземленной нейтрали	109
3.3.	Защита изоляции нейтрали с помощью ОПН-Н	116
3.4.	Внутренние перенапряжения на изоляции нейтрали	120
3.4.1.	Поперечная несимметрия	120
3.4.2.	Продольная несимметрия	122
3.5.	Расчеты процессов в программном комплексе ЕМТР	123
3.6.	Выбор основных характеристик ОПН-Н	136
3.7.	Обобщение полученных результатов	140
4.	ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В БЛОЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН	141
4.1.	Расчеты внутренних перенапряжений в блочной передаче 750/500 кВ	143
4.1.1.	Установившийся режим работы холостого блока АТ-ВЛ при его включении одной фазой на сеть 750 кВ	144
4.1.2.	Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом разброса в работе фаз выключателя 750 кВ	147

4.1.3. Переходный процесс отключения холостого блока АТ-ВЛ с учетом намагничивания и реальных параметров «системы»	150
4.1.4. Токовые и энергетические нагрузки на ОПН в блочной передаче 750/500 кВ и выбор характеристик ОПН	152
4.2. Расчеты внутренних перенапряжений в блочной передаче 110 кВ	156
5. ЗАЩИТА ВЛ 110-750 кВ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН	162
5.1. Основные типы подвесных ОПН и способ их присоединения к ВЛ	164
5.2. Исследования условий работы ОПН при различных сопротивлениях заземления опор, различном числе и местах установки ОПН на опорах с использованием упрощенной модели ВЛ	166
5.2.1. Упрощенная расчетная модель	167
5.2.2. Расчет перенапряжений на изоляции ВЛ в упрощенной модели	170
5.2.3. Упрощенный расчет токов в подвесных ОПН	179
5.2.4. Упрощенная оценка выделяющейся в подвесных ОПН энергии	188
5.3. Исследования условий работы ОПН с использованием полной расчетной модели ВЛ	190
5.3.1. Полная расчетная ЕМТР модель	190
5.3.2. Расчет перенапряжений в полной схеме	194
5.3.3. Расчет грозоупорности ВЛ в полной схеме	203
5.3.4. Расчет токов подвесных ОПН в полной схеме	210
5.3.5. Расчет в полной схеме выделяющейся в ОПН энергий	219
5.4. Выбор основных параметров подвесных ОПН	223
5.4.1. Выбор вольтамперной характеристики ОПН	223
5.4.2. Выбор ОПН по токовым и энергетическим воздействиям	224
5.5. Статистический подход к расчету грозоупорности ВЛ	228
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	236
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	241

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации изоляция оборудования подстанций (ПС) подвергается воздействию рабочего напряжения, а также различных видов перенапряжений. Основными защитными аппаратами (ЗА) для защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений являются вентильные разрядники (РВ) и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). При построении или модернизации уже существующих схем защиты от перенапряжений оборудования ПС с помощью ОПН и РВ необходимо решать две основные тесно связанные друг с другом задачи:

- выбор числа, мест установки и характеристик ЗА, которые обеспечат надежную защиту изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений;
- обеспечение надежной работы самих ЗА при квазистационарных перенапряжениях, для ограничения которых они не предназначены.

Защитные свойства РВ и ОПН основаны на нелинейности вольтамперной характеристики их рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального рабочего. Низкая нелинейность вольтамперной характеристики рабочих элементов в разрядниках не позволяла обеспечить одновременно и достаточно глубокое ограничение перенапряжений и малый ток проводимости при воздействии рабочего напряжения, от воздействия которого удалось отстроиться за счет введения последовательно с нелинейным элементом искровых промежутков. Значительно большая нелинейность окисно-цинковых сопротивлений (варисторов) ограничителей перенапряжений ОПН позволила отказаться от использования в их конструкции искровых промежутков, т.е. нелинейные элементы ОПН присоединены к сети в течение всего срока его службы.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с производства и в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Построение схем защиты изоляции оборудования как новых, так и

модернизируемых подстанций, от грозовых и коммутационных перенапряжений теперь оказывается возможным только с использованием ОПН.

Идентичность функционального назначения РВ и ОПН и кажущаяся простота конструкции последнего часто приводят к тому, что замену разрядников на ограничители перенапряжений проводят без проверки допустимости и эффективности использования устанавливаемого ОПН в рассматриваемой точке сети. Вместе с тем типовые схемы защиты изоляции оборудования от перенапряжений и характеристики защитных аппаратов были разработаны несколько десятилетий назад с использованием упрощенных расчетных моделей, так как возможности вычислительной техники были весьма ограничены.

Развитие компьютерной техники и специализированного программного обеспечения позволяют на новом уровне проводить расчеты переходных процессов в электрических сетях для оптимизации схем защиты изоляции оборудования от перенапряжений и обоснованного выбора основных характеристик защитных аппаратов.

Несмотря на возможности моделирования и расчетов переходных процессов в России до сих пор широко используют наработки многолетней давности, что стимулируется отсутствием простых в использовании и достаточно обоснованных современных методик расчета различных видов перенапряжений. Сложившийся в России недостаток созвучных времени нормативных документов и методик расчета в области защиты изоляции оборудования от перенапряжений усугубляется массовым внедрением в энергетику страны защитных аппаратов типа ОПН, при использовании которых зачастую некорректно решаются задачи по выбору числа ОПН, мест их установки и основных характеристик, что является причиной повышенной аварийности как защищаемого оборудования, так и самих ОПН.

Задачей работы являлась попытка рассмотреть с учетом современного уровня знаний и возможностей моделирования основные проблемы, которые

необходимо решать при построении схем защиты изоляции от перенапряжений с помощью защитных аппаратов типа ОПН. В число этих проблем входит разработка методических подходов к защите оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений, выбор и обоснование расчетных моделей для расчетов перенапряжений и характеристик ОПН, поиск наиболее эффективных схем расстановки защитных аппаратов.