

Гумерова Натэлла Идрисовна,

доцент кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений», Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, к.т.н., ст.н.с.

Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

Тел. 8-911-2573809

Эл. почта: nigumerova@mail.ru

Кузнецов Т.К.

студент электромеханического факультета кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений», Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

Тел. 8-952-2121733

Эл. почта: t-kuznezov@mail.ru

Данилин Аркадий Николаевич,

заведующий лабораторией высоковольтной электроэнергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д.21А

Эл. почта: danilin@ien.kolasc.net.ru

Селиванов Василий Николаевич,

ведущий научный сотрудник лаборатории высоковольтной электроэнергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д.21А

Эл. почта: selivanov@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.311

Б.В.Ефимов, Ю.М.Невретдинов, Д.И.Власко, А.О.Востриков

РЕГИСТРАЦИЯ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИИ*

Аннотация

В статье приведены результаты расчетных исследований распространения грозовых волн в линии с подключенными подстанциями 110 кВ. Сопоставляются возможности регистрации токов в шинах заземления аппаратов. Показано применение частотного метода обработки регистраций токов для локализации точки поражения ВЛ молнией и контроля грозовых перенапряжений.

Ключевые слова:

подстанция, грозовые перенапряжения, регистрация перенапряжений, локализация, шины заземления, частотный метод.

B.V.Efimov, Y.M.Nevretdinov, D.I.Vlasko, A.O.Vostrikov

REGISTRATION OF LIGHTNING OVERVOLTAGES IN THE SUBSTATION

Abstract

The results of lightning waves propagation researches calculation at the power line with connected substations 110 kV has been adduced in the article. The currents registration possibility at the devices ground busses are compared. The currents registration elaboration frequency procedure application for power line strike point localization by lightning and lightning overvoltages control has been showed.

Key words:

substation, lightning overvoltages, overvoltages registration, localization, ground busses, frequency procedure.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

Одним из основных вопросов молниезащиты электрических сетей является экономическая обоснованность мероприятий, которая определяется вероятностными характеристиками рисков. Поэтому статистика грозопоражаемости и параметров грозовых перенапряжений непосредственно определяет выбор систем и средств грозозащиты. В настоящее время достоверная информация о параметрах грозовых перенапряжений отсутствует, а статистика грозопоражаемости элементов сети фактически берется из сопоставления нарушений в сети и данных о прохождении грозовых фронтов.

Опубликованные результаты изучения эффективности грозопеленгации [1] показали, что существующие пеленгаторы имеют высокую погрешность и не позволяют выделять непосредственные удары молнии в воздушные ЛЭП или в подстанции. Таким образом, на настоящий момент грозопеленгация не позволяет достоверно оценить грозопоражаемость элементов сети.

В ЦФТПЭС КНЦ РАН уже длительное время ведутся разработки методов контроля распределения в высоковольтной сети экспериментально генерируемых токов [2, 3] и регистрации внешних электромагнитных воздействий, в т.ч. разрядов молнии [4]. В основном рассматривался метод регистрации токов в заземленной нейтрали силовых трансформаторов и автотрансформаторов, что обусловлено требованиями безопасности, доступностью установки и обслуживания регистраторов. Такой метод позволяет осуществить регистрацию токов в канале нулевой последовательности, формируемых на любой фазе, в широком частотном диапазоне, в т.ч. низкочастотных и сверхнизкочастотных, а также контролировать слабые возмущения [5].

Для изучения направлений развития методов регистрации перенапряжений использованы результаты натурных экспериментов с генерированием импульсных напряжений в высоковольтной сети – на воздушной ЛЭП с подключением участка РУ подстанции. Эксперименты выполнялись в сети Кольской энергосистемы с 1977 г. и продолжаются до настоящего времени. Применение многоканальных цифровых осциллографов позволяет повысить качество экспериментальных регистраций импульсных процессов (в микросекундном диапазоне) в натурных условиях.

Данные экспериментов, проведенных в 2011 г. [4] на подстанции 110 кВ с подключенной воздушной ЛЭП (ВЛ), использованы в качестве критериев оценки точности моделирования импульсных процессов на участке воздушной ЛЭП 110 кВ с РУ. В модели, реализованной в среде АТР ЕМТР учтены волновые процессы в ВЛ, формирование перенапряжений в РУ и эмиссия импульсных процессов в нейтраль силового трансформатора.

На рисунке 1а и б представлены примеры сопоставления осциллограмм напряжений на силовом трансформаторе, полученных экспериментально в действующей сети и расчетных на модели в АТР ЕМТР. Эксперимент с генерированием импульсных напряжений проведен на участке сети 110 кВ, выведенном из работы и включающем ВЛ протяженностью 13.2 км и часть РУ с одним силовым трансформатором. На противоположном конце ВЛ провода заземлены. На рис.1а показан вариант формирования импульсных напряжений на силовом трансформаторе при отсутствии срабатывания защитного аппарата. На рис.1б даны осциллограммы импульсных напряжений на силовом трансформаторе при моделировании срабатывания защитного аппарата ОПН 110, подключенного на системе шин вблизи трансформатора напряжения.

Как видно, расчетная модель позволяет с достаточной точностью рассчитывать импульсные процессы в РУ с подключенными ВЛ. В частности, точно воспроизводятся отражения от точки подключения ГИН и от заземления проводов ВЛ в РУ на противоположном конце.

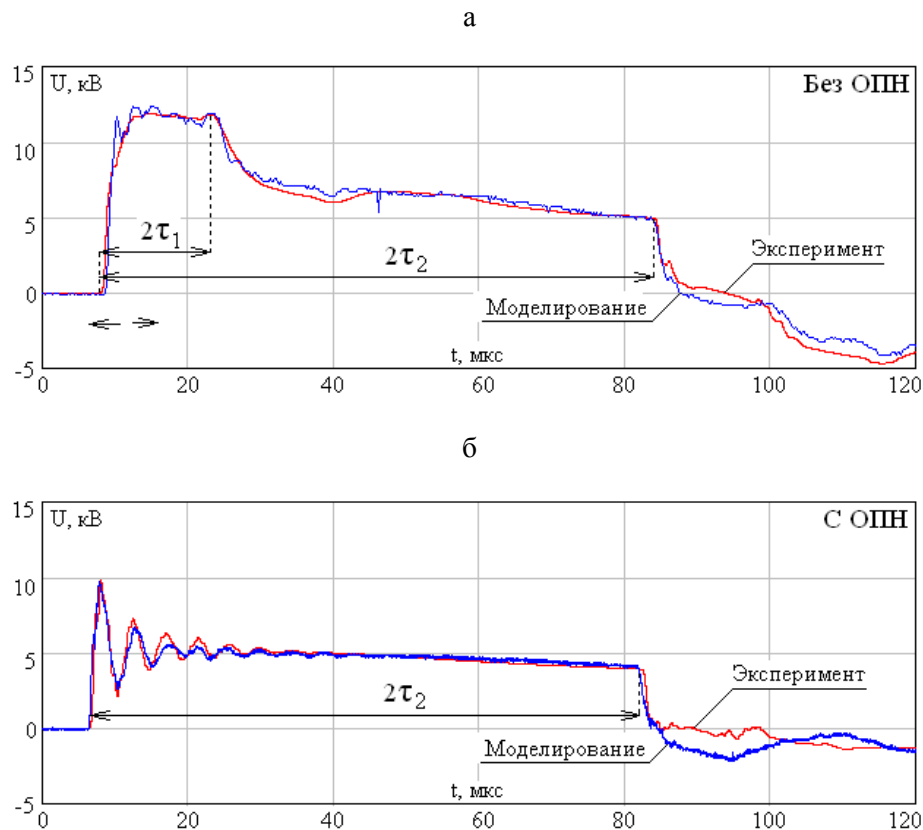


Рис.1. Сопоставление осциллограмм импульсных напряжений на трансформаторе РУ 110 кВ, полученных экспериментально и расчетным путем на модели РУ с подключенной ВЛ:

а) эксперимент при отсутствии защитного аппарата; б) эксперимент с моделью ОПН-110; τ_1 – время распространения волны от точки подключения ГИН до подстанции; τ_2 – время распространения волны от ГИН до подстанции на противоположном конце ВЛ

Некоторое отличие формы расчетных напряжений объясняется неточностью моделирования соединения ГИН с проводом ВЛ, ошиновки и спусков РУ подстанции, емкостных характеристик оборудования РУ, а также неоднородностью грунта в районе расположения ВЛ.

На осциллограмме напряжения на трансформаторе для эксперимента с отсутствием срабатывания защитного аппарата (рис.1а) отчетливо виден момент времени появления отражений от точки подключения ГИН ($2\tau_1$) и от подстанции на противоположном конце ВЛ ($2\tau_2$). Таким образом, осциллограммы перенапряжений могут дать информацию о расположении места возникновения импульсного напряжения на проводах ВЛ.

Однако на осциллограмме напряжения на трансформаторе в эксперименте с моделированием срабатывания ОПН (рис.1б) отражение от точки подключения ГИН практически отсутствует, что объясняется влиянием высоко нелинейной вольт-амперной характеристики ОПН.

Для проверки возможностей регистрации перенапряжений в РУ и повышения информативности регистраций на модели ВЛ с подключенными подстанциями выполнены расчеты для вариантов формирования перенапряжений на проводе ВЛ на различном удалении от места регистрации в РУ подстанции. Изучалась перспективность регистрации перенапряжений на оборудовании РУ и токов в шинах заземления. Модель исследуемой подстанции 110 кВ включает два силовых трансформатора с двумя комплектами ОПН, установленных на расстоянии 35 м от трансформаторов (по ошиновке), и двумя подключенными ВЛ. Схема участка приведена на рис.2.

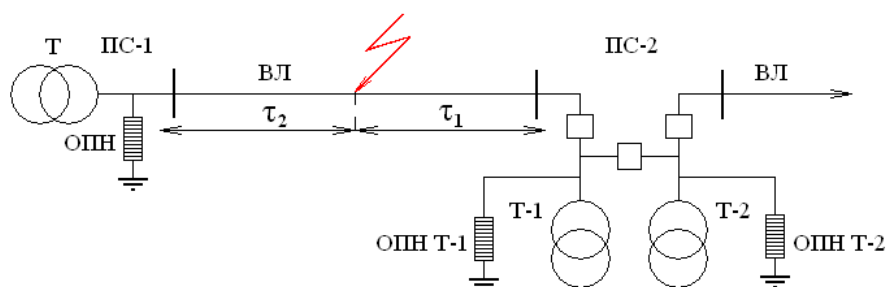


Рис.2. Схема расчетного участка сети

Соответствующая модель участка сети, реализованная в АТР ЕМТР, представлена на рис.3.

В модели реализованы процессы формирования грозовых перенапряжений при ударах молнии в провода ВЛ на участке с тросом (подход к ПС-1) и на участке без троса.

Моделирование грозовых волн на проводах выполнено для варианта прямого удара молнии в провод с перекрытиями изоляции ВЛ на ближайших опорах по обе стороны от точки удара молнии. Учтено также затухание фронта волны по мере распространения по проводу ВЛ, а также влияние электромагнитной связи пораженного провода с проводами других фаз. Длина ВЛ выбрана относительно небольшой (13..14 км) для того, чтобы получить наложение отражений от противоположной подстанции на процесс формирования перенапряжений. На удаленной подстанции также учтены емкости двух силовых трансформаторов, выключателей и трансформаторов тока, а также действие ОПН.

Ниже на рисунках приведены вольт-амперная характеристика ОПН-1, ОПН-2 и ОПН ПС-2 (см. рис.4) и вольт-секундная характеристика линейной изоляции (блок MOD Flash, см.рис.5), используемые в расчетной модели.

Для иллюстрации наложения отражений на импульсные напряжения в РУ на рис.6 дано сопоставление осциллограмм напряжений в вариантах удара молнии (с перекрытиями изоляции ВЛ) на удалениях ($l_{\text{ПУМ}}$) 2.1 км, 5.1 км и 10.1 км.

На приведенных осциллограммах отмечено появление отражений от точки формирования волны (с перекрытиями изоляции ВЛ) ($2\tau_1$) и от противоположного конца ВЛ. $2\tau_2$ – соответствует двойному времени распространения волны от точки удара молнии до противоположной подстанции ПС-2. Как видно из рис.6, время появления отражения от точки удара не точно фиксируется при близких (менее 2.1 км, рис.6а, г) и при дальних (рис.6в, е) ударах молнии. Кроме того, осциллограмма напряжения на ТТ В Т-1 содержит большое число высокочастотных гармоник, которые затрудняют интерпретацию регистраций.

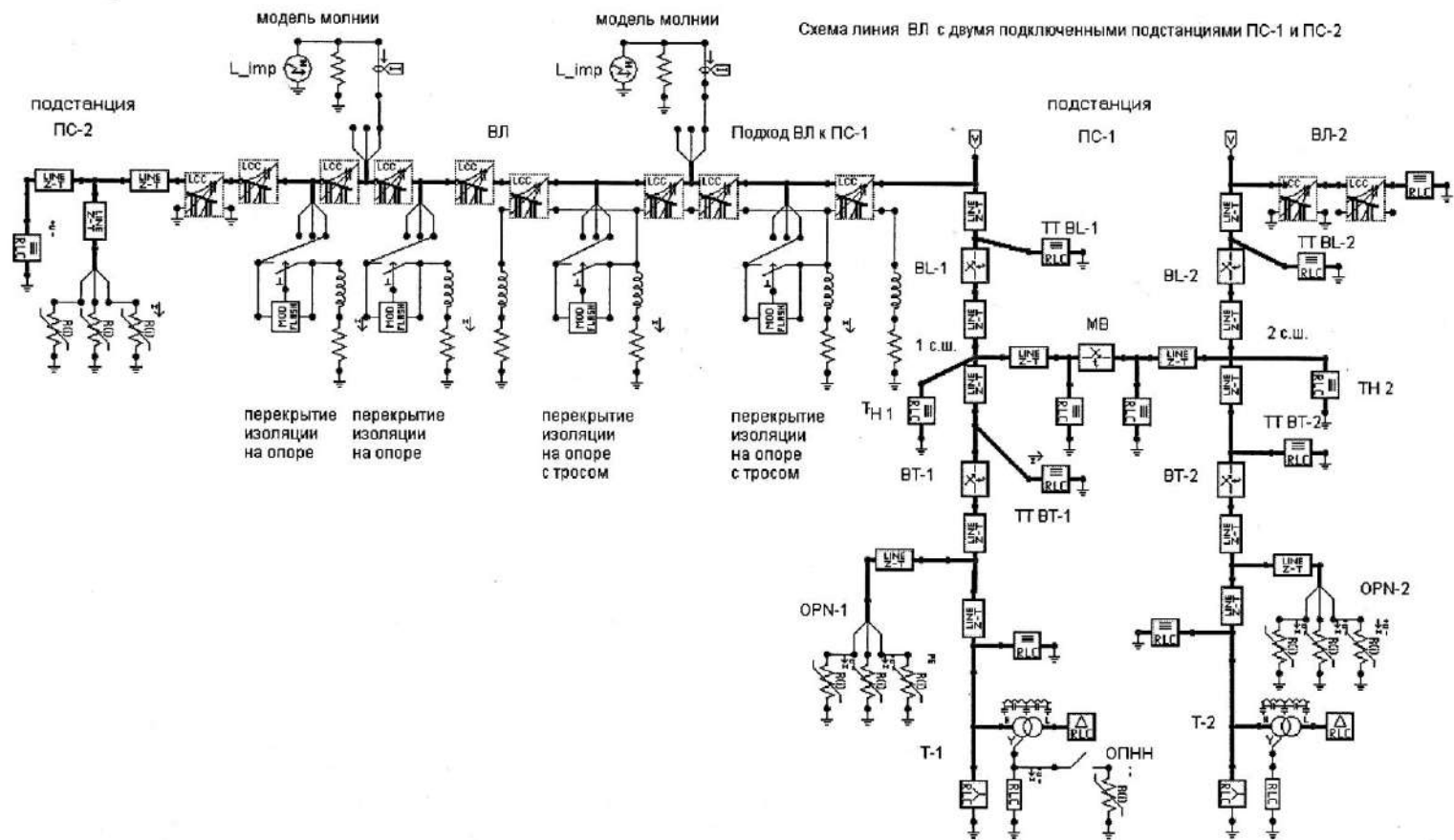


Рис.3. Расчетная модель участка сети с линией, подключенной к двум подстанциям

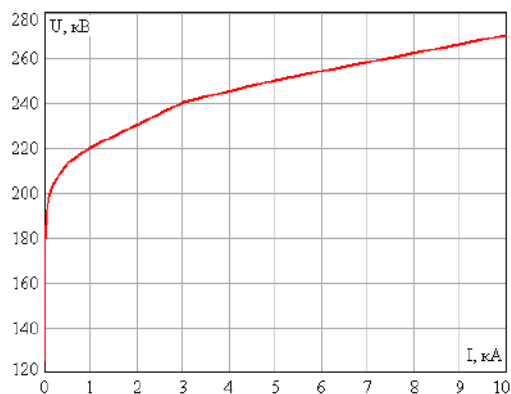


Рис.4. Вольтамперная характеристика ОПН-1, ОПН-2 и ОПН ПС-2

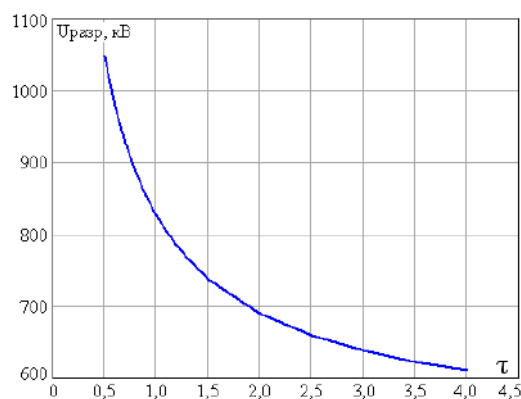


Рис.5. Вольт-секундная характеристика линейной изоляции

На рисунках 7 и 8 приведены осциллограммы токов в шине заземления нейтрали трансформатора Т-1 и ОПН Т-1 (рис.7), а также токов в шине заземления трансформатора тока ТТ выключателя В Т-1 и в емкости ввода ф. А Т-1 (рис.8).

Из представленных на рис.7 и 8 данных видно, что наиболее точную информацию о процессах отражений дают осциллограммы токов в ОПН (рис.7г, д, е). Однако следует отметить, что при снижении напряжений волн, сопровождаемых уменьшением тока в ОПН до десятков ампер, информативность существенно снижается.

Также, отражения от точки удара молнии выделяются на осциллограммах токов, протекающих через емкости вводов трансформатора (рис.7г, д, е). Но селективность этих отражений снижается при близких (менее 2 км) и при дальних (10 км и более) ударах молнии.

Вследствие наложения высокочастотных процессов снижается информативность осциллограмм токов в шинах заземления трансформаторов тока (рис.8а, б, в) и нейтралей трансформаторов (рис.8а, б, в).

Оперативная обработка регистраций в режиме реального времени может быть выполнена для получения спектров. Варианты спектров токов в ОПН для определения расстояния от подстанции до точки формирования грозовой волны на проводах ВЛ приведены на рис.9. Здесь показано сопоставление спектров тока в ОПН для случаев близких ударов молнии (менее 2 км) и удаленных ударов (2 км и более).

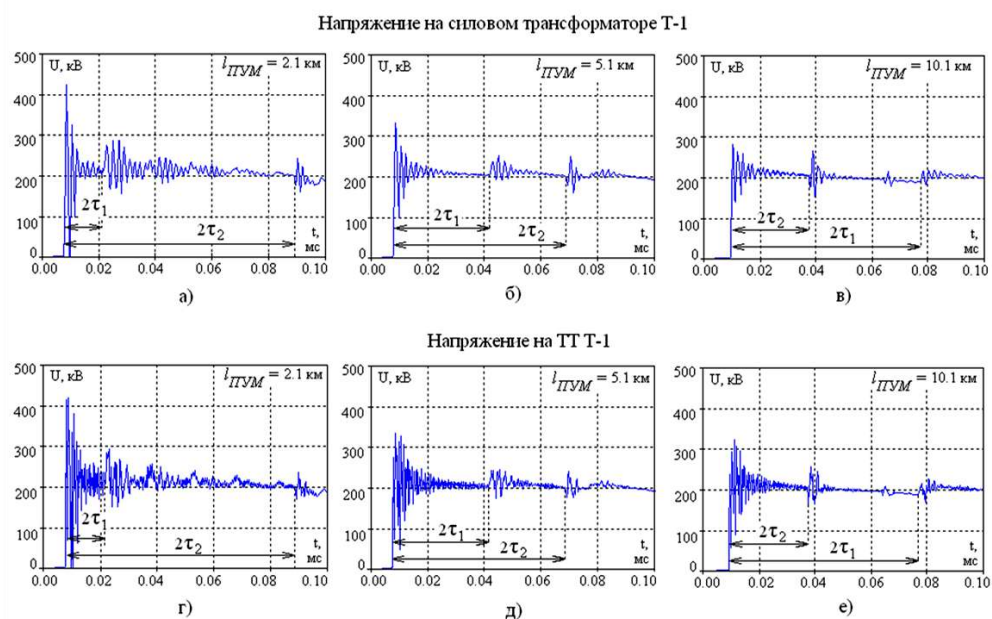


Рис.6. Осциллограммы напряжений на силовом трансформаторе Т-1 (ПС-1) (а, б, в) и на трансформаторе тока выключателя ТТ В Т-1 (г, д, е) для различных удалений точки удара молнии ($l_{ПУМ}$) от ПС-1

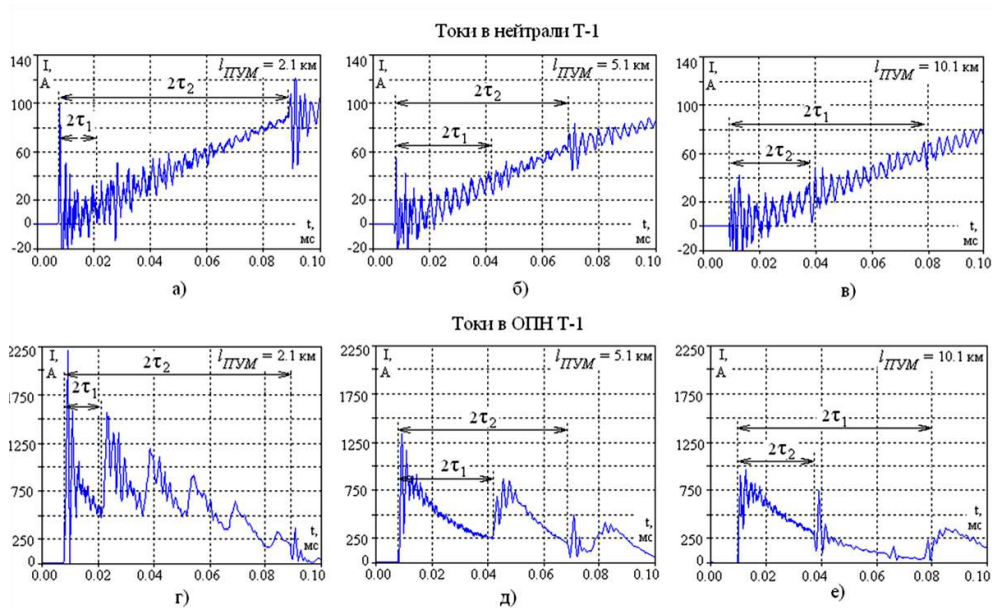


Рис.7. Осциллограммы токов в шинах заземления нейтрали трансформатора Т-1 (а, б, в) и ОПН Т-1 (г, д, е) для различных удалений точки удара молнии ($l_{ПУМ}$) от ПС-1

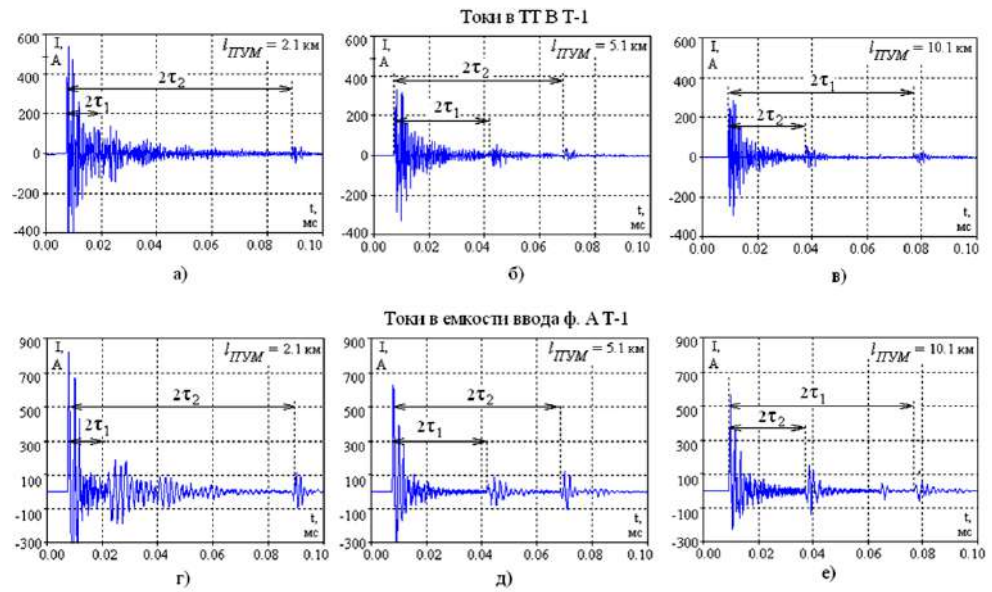


Рис.8. Осциллограммы токов в шине заземления трансформатора тока ТТ В Т-1 (а, б, в) и в емкости ввода фазы А Т-1 (г, д, е)

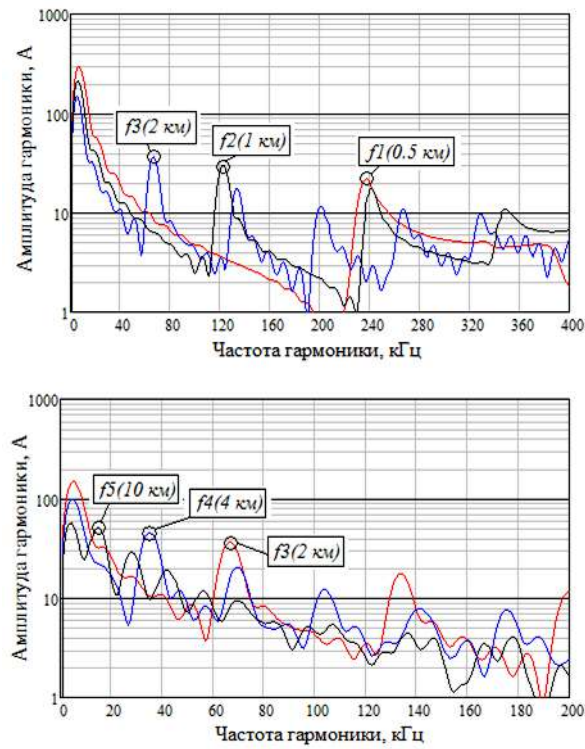


Рис.9. Спектры токов в ОПН для определения расстояния от до точки удара молнии в ВЛ:
 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 – гармоники отражений от точки удара молнии с перекрытием изоляции ВЛ на расстояниях 0.5 км (f_1), 1 км (f_2), 2 км (f_3), 4 км (f_4), 10 км (f_5).

На спектрах выделены области гармоник, соответствующих формированию грозových волн на удалениях 0.5 км, 1 км, 2 км, 4 км и 10 км. Как видно, достаточно точно фиксируются гармоники, соответствующие ударам молнии в подход ВЛ к подстанции, например, $f_1 = 238\text{--}240$ кГц при ударе молнии на расстоянии 500 м.

Следует отметить, что регистрации токов в шинах заземления защитных аппаратов трансформаторов тока и т.п. полностью удовлетворяют требованиям безопасности и оперативности обслуживания. Кроме того, емкостные токи с помощью интегрирования относительно просто интерпретируются для получения характеристик перенапряжений.

Регистрация емкостных токов в вводах силовых трансформаторов возможна, если в вводах предусмотрены выводы измерительной обкладки, но затруднена необходимостью компоновки датчика и передающего устройства внутри коробки подключения.

Таким образом, развитие методов регистрации и мониторинга перенапряжений в РУ возможно в направлениях развития датчиков тока, оперативной обработки и сбора информации, а также совершенствования методов интерпретации регистраций и оценки погрешности.

Литература

1. Анализ результатов регистрации разрядов молнии опытной четырехпунктной сетью грозопеленгации на Северо-Западе России в августе 2008 г. А.Н.Новикова, О.В.Шмараго, В.С.Снегуров, А.В.Снегуров – Доклады Второй Российской конференции по молниезащите, М.: ЭНИН, 10 с. с илл.
2. Совершенствование методов генерирования СНЧ-КНЧ электромагнитных полей с использованием промышленных ЛЭП и контроля влияния на действующую высоковольтную сеть и кабели связи. Ю.М.Невретдинов, И.М.Зархи, А.А.Жамалетдинов, Г.П.Фастий, И.Е.Кабеев, А.В.Бурцев – Препринт, Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2005. – 68 с.
3. Экспериментальные исследования эффективности каскадной молниезащиты подстанций. Ю.М.Невретдинов, Е.А.Токарева, Д.И.Власко, А.П.Домонов – Вестник МГТУ, 2009 г., 1 выпуск, С. 70.
4. Проблемы и перспективы регистрации грозových перенапряжений в действующей сети. Д.И.Власко, А.О.Востриков, А.П.Домонов, Ю.М.Невретдинов. – Труды Кольского научного центра РАН, Энергетика, 2011 г., выпуск 3. С. 54.
5. Результаты длительных регистраций токов в нейтралях силовых трансформаторов. В.Н.Селиванов, А.Н.Данилин, В.В.Колобов, Я.А.Сахаров, М.Б.Баранник. – Труды Кольского научного центра РАН, Энергетика, 2010 г., выпуск 1. С. 84.

Сведения об авторах

Ефимов Борис Васильевич,

директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, д.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А
Эл. почта: efimov@ien.kolasc.net.ru

Невретдинов Юрий Масумович,

заведующий лабораторией надежности и эффективности оборудования энергосистем
Цentra физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А
Эл. почта: ymnevrt@mail.ru

Власко Денис Игоревич,

стажер-исследователь лаборатории надежности и эффективности оборудования энергосистем Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН.
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А
Эл. почта: den-energy@yandex.ru

Востриков А.О.,

лаборант лаборатории надежности и эффективности оборудования энергосистем Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН.
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А
Эл. почта: vostrik-aleksandr@yandex.ru

УДК 621.311

Д.В.Куклин

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ*

Аннотация

В статье представлены результаты расчетов переходных сопротивлений заземлителей опор линий электропередачи с целью выбора оптимального варианта заземлителя. Сделан краткий анализ полученных результатов.

Ключевые слова:

метод конечных разностей во временной области, переходное сопротивление, заземление.

D.V.Kuklin

CALCULATIONS OF TRANSIENT RESISTANCE OF TRANSMISSION LINE TOWERS' GROUNDINGS USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Abstract

Calculation results of transient resistance of transmission line towers' groundings are represented in the article for the purpose of choosing optimal grounding. Short analysis of calculation results is made.

Key words:

finite difference time domain method, transient resistance, grounding.

Известно, что конструкция заземлителя опоры включает горизонтальные и вертикальные проводники, а также ее железобетонные фундаменты. Взаимное экранирование отдельных частей заземлителя приводит к тому, что сопротивление сложного заземлителя оказывается выше суммы сопротивлений отдельных его частей. Также, у протяженных заземлителей опор при протекании через заземлитель импульсных токов, на его сопротивление влияют распределенные емкость и индуктивность. И в первые моменты времени приложения импульса тока, сопротивление заземлителя высоко, т.к. в отводе тока участвует только часть заземлителя. В связи с этими особенностями, для получения заземления с оптимальным значением сопротивления нужно учитывать взаимное расположение проводников в земле.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).