

Создание системы автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ по НИОКР ПАО «Россети Кубань»

А.В. Жуйков¹, Д.А. Матвеев¹, Г.Е. Масин², Б.С. Литаш²

1 – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2 – ПАО «Россети Кубань»

Аннотация

В докладе охарактеризованы результаты работы по созданию системы автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ, включающей в себя реализованную в виде проекта стандарта организации методику проектирования, базу данных по типовым техническим решениям и программный комплекс, состоящий из ранее разработанных программ и нового ПО, обеспечивающего расчет статистических параметров, характеризующих грозовые отключения ВЛ и повреждения изоляции подстанционного оборудования от набегающих с линий волн грозового происхождения. Внедрение разработанной системы позволит решить актуальные задачи повышения надежности молниезащиты объектов электросетевого хозяйства при одновременном снижении трудозатрат проектировщиков и требований к их опыту и квалификации.

Территория Краснодарского края и Республики Адыгея подвержена высокому уровню грозовой активности, что сопровождается значительным числом отключений воздушных линий (ВЛ) 35–110 кВ при грозе (рисунок 1). Воздушные линии 35 кВ в сетях с изолированной нейтралью в меньшей степени подвержены воздействию грозовых перенапряжений по сравнению с линиями 110 кВ, эксплуатирующимися в сетях с заземленной нейтралью (рисунок 2). Поэтому именно для ВЛ напряжением 110 кВ в ПАО «Россети Кубань» задача повышения грозоупорности считается наиболее актуальной.

Анализ нарушений в работе электросетевых объектов в грозовой сезон показывает, что большинство таких нарушений обусловлено несовершенством проектирования защиты от грозовых воздействий. Прежде всего, это связано с тем, что при проектировании выбор мероприятий по молниезащите основывается на устаревших методах и средствах, предусмотренных действующими нормативными документами [1]. Применяются усредненные и устаревшие данные по грозовой активности, не учитываются новые средства обеспечения грозоупорности. Проектирование осуществляется с низким уровнем автоматизации процесса и основывается на применении разрозненных нормативных документов и программных средств.

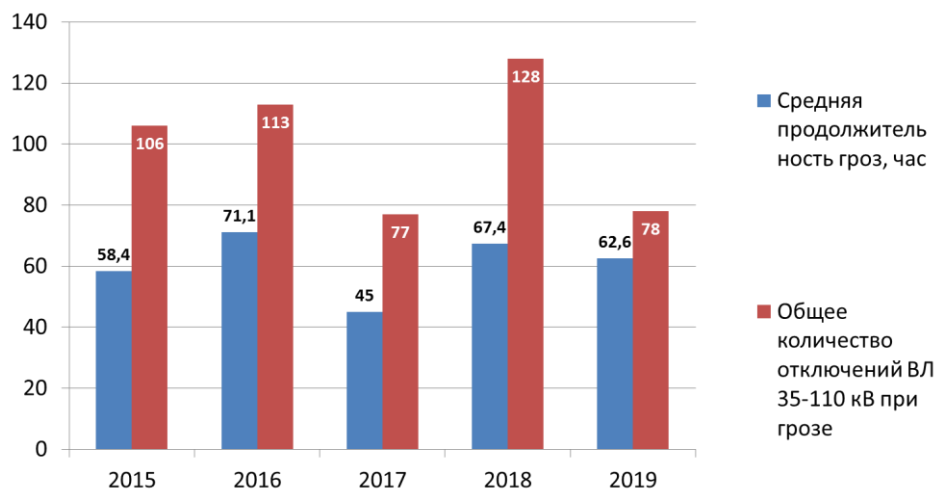


Рисунок 1 – Распределение по годам уровня грозовой активности на территории эксплуатационной ответственности ПАО «Россети Кубань»

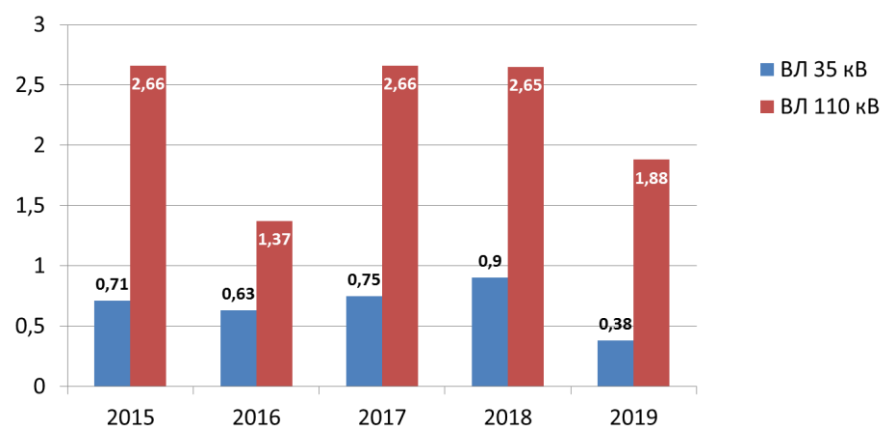


Рисунок 2 – Распределение по годам удельных чисел грозовых отключений (на 100 км длины ВЛ и 100 грозовых часов)

Сказанное относится не только к проектированию ВЛ, но и к комплексу задач проектирования подстанций. В относительно недавно появившемся стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» [2] в разделе «Защита РУ и ПС от коммутационных перенапряжений и набегающих с ВЛ грозовых волн» в п. 8.1.9 сказано: «Число и места установки ОПН, расстояние по ошиновке от ОПН до трансформаторов и другого защищаемого оборудования ОРУ 110 кВ следует выбирать **расчетным путем** с учетом схемы ОРУ, числа отходящих ВЛ, длины подхода ВЛ, интенсивности грозовой деятельности, исходя из защитных характеристик ОПН и нормированных ГОСТ 1516.3 испытательных напряжений для защищаемого оборудования». Перечень программного обеспечения (ПО) перечислен в сноске 5: «Коммерческие программы для расчета переходных процессов в электрических сетях: NI Multisim, Simulink, EMTP-RV, ATP-EMTP, MicroTran, RTDS Simulator, PSCAD-EMTDC и др.».

Все перечисленные программы, по сути, представляют собой универсальные программные комплексы для численного моделирования переходных процессов, адаптация которых к расчету грозовых перенапряжений и проектированию молниезащиты сложна и требует исключительно высокой квалификации специалистов, разрабатывающих модели для проектных расчетов.

Методические указания по применению ОПН на ВЛ [3] позволяют осуществить выбор оптимального технического решения без численного моделирования грозовых перенапряжений только для ограниченного круга типовых ВЛ.

С учетом сказанного, в 2017 году ПАО «Россети Кубань» была инициирована научно-исследовательская работа (НИОКР) по созданию системы автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ. Целью работы являлась автоматизация проектирования молниезащиты объектов электросетевого хозяйства с использованием новых методик и технических средств для повышения качества проектирования и снижения технологических нарушений в период грозового сезона. При этом перед разработчиками системы стояла задача максимально упростить и ускорить труд проектировщиков, автоматизируя сложные технические нюансы моделирования, тем самым избавляя проектировщиков от необходимости решать вопросы моделирования коронного разряда на проводах, индуктированных каналом молнии напряжений, искажения форм волн грозовых перенапряжений при пробеге по линии и т.д. Для этого было решено разработать программное обеспечение (ПО), к которому предъявлены следующие принципиальные требования:

- учет современных технических средств молниезащиты;
- возможность автоматического применения типовых технических решений;
- быстрое задание исходных данных и обоснованное применение упрощенных подходов при отсутствии полного набора необходимых данных.

Разработка ПО была осуществлена в НИУ «МЭИ». Программа получила название LPLab (Lightning Protection Laboratory) и состоит из двух модулей. В основе модуля «Молниезащита ВЛ» лежит расчет числа грозовых отключений ВЛ как основного показателя грозоупорности. Модуль «Молниезащита ПС» обеспечивает расчет защиты ПС от грозовых перенапряжений, вызванных набеганием с ВЛ волн грозового происхождения. Для полной автоматизации проектирования молниезащиты ПС помимо разработанного ПО программный комплекс был укомплектован уже готовыми и верифицированными в ходе работы программными модулями:

- МЗПС: автоматизированный расчет и построение зон защиты молниеотводов на ПС;

- ORU-M: расчет обратных перекрытий на первичные и вторичные цепи;
- Interference: расчет наведенных импульсных напряжений во вторичных цепях.

Помимо создания программного комплекса полной автоматизации проектирования молниезащиты ВЛ и ПС были разработаны:

- методика автоматизированного проектирования молниезащиты объектов электросетевого хозяйства, оформленная в виде проекта стандарта ПАО «Россети» «Требования к автоматизированному проектированию молниезащиты электрических подстанций и воздушных линий электропередачи»;

- база данных по экономически обоснованным типовым техническим решениям по молниезащите объектов электросетевого хозяйства;

- методика, в соответствии с которой выполнены анализ и верификация компьютерных программ для применения в составе системы автоматизированного проектирования.

Структура разработанной системы автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ отражена на схеме рисунка 3.

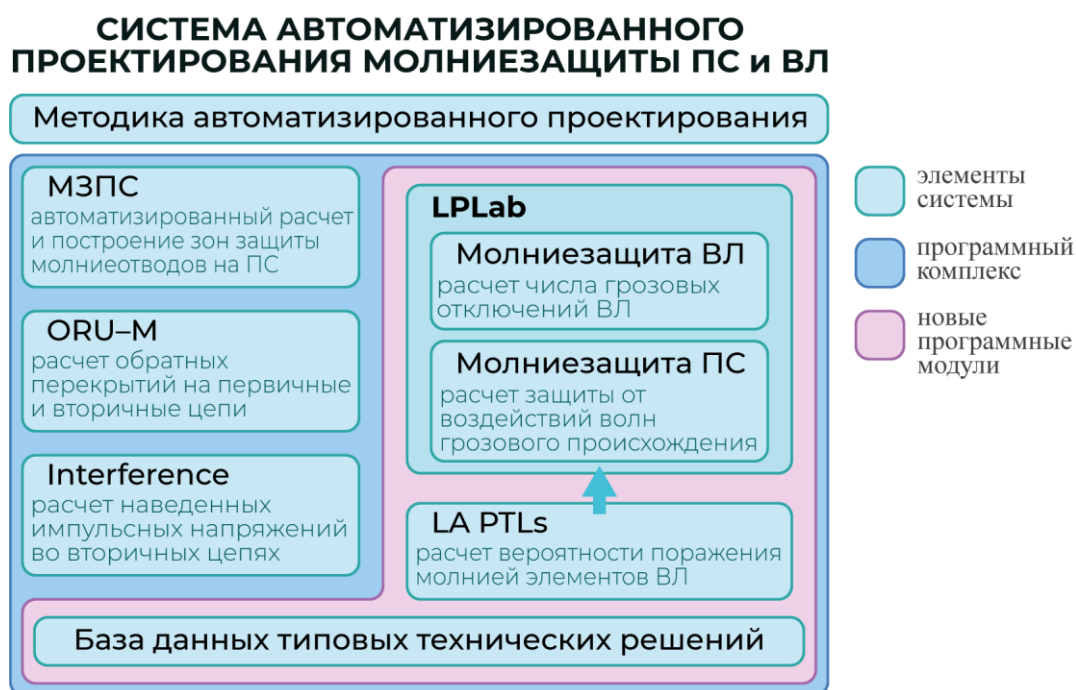


Рисунок 3 – Структура системы автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ

Алгоритм автоматизированного проектирования молниезащиты ПС с помощью программного комплекса можно кратко сформулировать следующим образом:

- 1) в базе данных по типовым решениям молниезащиты ПС выбирают наиболее близкое решение к проектируемому объекту;

- 2) принимают проектное решение, аналогичное выбранному типовому решению;
- 3) проводят расчеты зон защиты от прямого удара молнии (модуль МЗПС);
- 4) проводят расчеты вторичных воздействий молнии и сравнивают их с допустимыми (модули ORU-M и Interference);
- 5) проводят расчеты защиты от грозовых перенапряжений (LP Lab – молниезащита ПС).

Если требования по надежности защиты от воздействий молнии не выполняются, то применяют дополнительные мероприятия для повышения надежности защиты.

База данных типовых решений по молниезащите ПС представляет собой структурированную коллекцию файлов, содержащих планы расположения зданий и оборудования, а также схему расстановки молниеотводов с учетом требований электромагнитной совместимости (ЭМС).

Типовое проектное решение выбирается в следующей последовательности:

- тип подстанции: открытая, закрытая, закрытая с ОПП;
- номинальное напряжение ПС;
- экранирование контрольных кабелей;
- тип кабельной канализации;
- удельное сопротивление грунта;
- принципиальная электрическая схема распределительного устройства.

Результатом выбора являются файлы с типовой схемой молниезащиты, соответствующей заданным параметрам подстанции, выполненной с учетом обеспечения требований ЭМС.

Применительно к ВЛ расчет их грозовых отключений выполняется по заложенным в компьютерную программу заранее подготовленным разработчиками ПО номограммам для типовых случаев, что существенно ускоряет расчетную процедуру. Если проектное решение отличается от типового, то программа осуществляет численное моделирование грозовых перенапряжений на ВЛ.

Если расчетное число грозовых отключений ВЛ для базового проектного решения превышает допустимое, то выбираются одно или несколько мероприятий по повышению грозоупорности:

- снижение импульсных сопротивлений заземляющих устройств;
- изменение углов тросовой защиты;
- подвеска дополнительных тросов, в том числе в межфазовом пространстве ВЛ;
- усиление линейной изоляции;
- применение опор других типов;

– применение защитных аппаратов (линейные ограничители или линейные разрядники в соответствии с терминологией [3]).

Выполняются расчеты для всех выбранных вариантов, на основании результатов которых проектировщик принимает решение о мероприятиях по повышению грозоупорности ВЛ.

Рассмотрим основные положения, заложенные в основу алгоритмов расчета молниезащиты ВЛ и ПС, реализованных в разработанном ПО.

Программный модуль проектирования молниезащиты ВЛ

Расчетным показателем грозоупорности ВЛ является удельное число грозовых отключений на 100 км за 100 грозовых часов. При прямых ударах молнии в ВЛ принимается, что перекрытия линейной изоляции происходят только на опоре, а именно, вдоль гирлянды изоляторов. При расчете грозоупорности ВЛ 110–750 кВ ближние удары молнии не учитываются.

Грозоупорность ВЛ рассчитывается только для первой компоненты молнии, так как вероятность перекрытия изоляции при воздействии последующих компонент значительно меньше, чем при воздействии первой компоненты.

Число необходимых расчетных случаев для оценки грозоупорности определяется особенностями молниезащиты ВЛ: наличием тросовой молниезащиты, защитных аппаратов (ЗА) и вариантами их расстановки на ВЛ. Рассчитываются случаи ударов в опору, в трос (при его наличии) и в фазный провод. Учет влияния ЗА осуществляется по методике [4–7], созданной при разработке стандарта [3].

Расчеты вероятностей перекрытий гирлянд изоляторов проводят с учетом возникающих на ВЛ переходных процессов. Вероятность перекрытия гирлянды изоляторов определяется с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло как отношение числа перекрытий к общему числу проведенных расчетов.

Алгоритм расчета числа грозовых отключений многоцепной ВЛ аналогичен алгоритму для одноцепных ВЛ. Фиксируются отключения не только одной цепи, а двух и более (в зависимости от их количества) одновременно при воздействии первого импульса тока молнии.

Определение вероятности отключения двух и более цепей осуществляется следующим образом.

- 1) Устанавливается наличие первого перекрытия одной из гирлянд изоляторов.
- 2) Производится дальнейший расчет напряжений на других гирляндах изоляторов с установлением факта их перекрытия.

По окончанию расчета становится известным какие гирлянды были перекрыты и к какой цепи ВЛ они принадлежат. Если все перекрытые гирлянды принадлежат одной цепи, то это соответствует случаю отключения одной цепи и отсутствия многоцепных отключений. Если перекрытые гирлянды принадлежат разным цепям, то этот случай соответствует отключению нескольких цепей одновременно.

Для ВЛ с защитными аппаратами, установленными во всех фазах и на всех опорах, проведение расчетов грозоупорности не требуется. При таком варианте расстановки защитных аппаратов принимается, что расчетное число грозовых отключений ВЛ равно нулю, при этом надежность работы ЗА характеризуется средним числом лет их безаварийной работы [3].

В расчетах учитываются:

- геометрическое расположение проводов и тросов в пролете ВЛ в соответствии со схемами подвески проводов на опорах с учетом провисания проводов в пролете ВЛ, длины пролетов;

- рабочее напряжение ВЛ;

- конструктивные особенности опор;

- сопротивления заземляющих устройств опор;

- параметры импульса тока молнии (функции распределения амплитуды, длительности фронта и крутизны импульса тока молнии);

- распределение вероятности места удара (расстояние от точки удара до опоры) в пролете ВЛ;

- импульсная корона на проводах ВЛ (учитывается с помощью подхода [8]).

При выполнении НИОКР исследовались различные методы оценки импульсной электрической прочности изоляционных подвесок ВЛ. Было показано, что расчет по вольт-секундным характеристикам (ВСХ) дает значительные погрешности, если использовать его для оценки разрядных напряжений при реальных формах воздействующего импульсного напряжения. Поэтому в программе реализованы метод эквивалентных площадей (МЭП) и метод развивающегося лидера [9, 10].

Расчет грозопоражаемости ВЛ осуществляется в соответствии с [11], но имеет возможность подключения модуля LA PTLs (Lightning Affection of Power Transmission Lines) расчета вероятностей поражения ВЛ молнией, обеспечивающего:

- учет объектов, расположенных вдоль трассы ВЛ, и оказывающих экранирующее влияние;

- расчет распределения вероятностей поражения отдельных конструктивных элементов ВЛ (тросов, фазных проводов, опор);

– расчет распределения вероятностей поражения фазных проводов и тросов вдоль пролета;

– расчет функции распределения вероятностей параметров импульсов тока молнии с учетом поражения конкретного элемента ВЛ.

Этот модуль был разработан по заказу ПАО «Россети Кубань» в рамках отдельной НИОКР, в нем отражены результаты многолетней работы кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ» по разработке теоретических основ вероятностного подхода к оценке грозопоражаемости [12, 13].

Программный модуль проектирования защиты ПС от набегающих волн грозового происхождения

Статистические расчеты среднего числа лет безаварийной работы ПС при воздействии набегающих с ВЛ волн осуществляется на расчетной модели подстанции совместно с ВЛ. В результате расчетов определяется совокупность волн, возникающих на подходе ВЛ к подстанции и приводящих к появлению на электрооборудовании напряжений, превышающих заданную величину. Интегрирование по полученной таким образом трехмерной области при известных плотностях вероятности дает оценку вероятности этого события. Результатом действия программы является определение вероятного числа и повторяемости превышающих некоторый заданный уровень перенапряжений, возникающих в схеме подстанции от набегающих с ВЛ грозовых волн. Такой подход имеет ряд преимуществ: учитывается, что не все удары на подходе являются опасными; появляется возможность учета изменения вероятности поражения по длине линии; возможно исследование влияния конструктивных особенностей подхода, таких как наличие тросовой защиты, параллельных фаз, противовесов, плохо проводящего грунта и др. не только на характер деформации волн, но и на конечный результат – надежность грозозащиты подстанции или вероятность появления напряжений с заданными параметрами.

В программе реализован метод Монте-Карло, для применения которого требуется подготовка большого числа различных расчетных моделей с варьированием точки удара молнии и конфигурации схемы. При этом непосредственная работа оператора с программой для решения этой задачи не подразумевается. Расчетные модели создаются автоматически в программном комплексе автоматизированного проектирования молниезащиты. При необходимости программа обеспечивает возможность ручной корректировки сгенерированных расчетных схем.

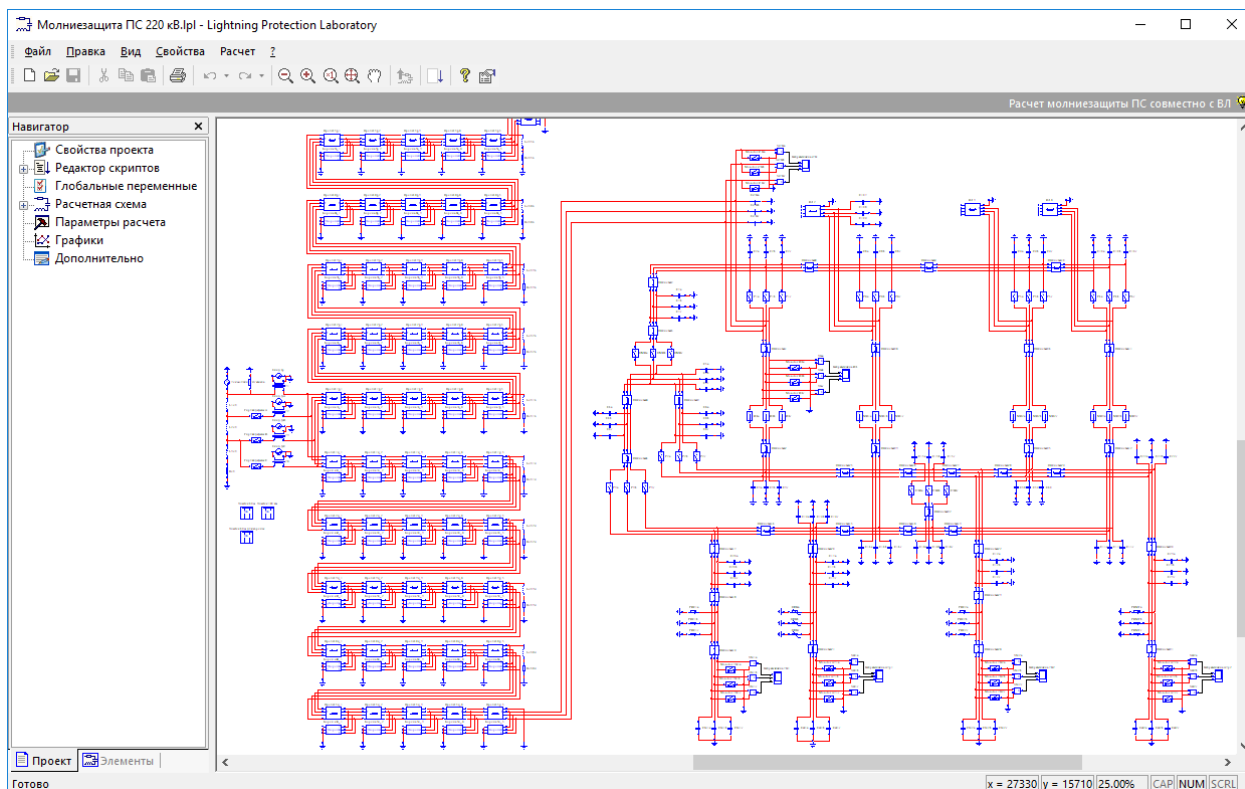


Рисунок 4 – Расчетная модель ПС совместно с ВЛ в программе LPLab

Пример расчетной модели ПС совместно с ВЛ приведен на рисунке 4. Соответствующая однолинейная схема приведена на рисунке 5. Модель ВЛ, расположенная на рисунке 4 слева от модели ПС содержит пролеты ВЛ, заданные несколькими участками, в конце которых расположены блоки моделей импульсной короны. Удар молнии в опору моделируется источником тока, заданным моделью СИГРЭ, в модели опоры учитываются индуктированные каналом молнии напряжения. Гирлянды изоляторов заданы блоками, в которых по методу эквивалентных площадей определяется выполнение условия импульсного перекрытия.

Подстанция смоделирована в трехфазной постановке, участки ошиновки моделируются с учетом её волновых свойств, а оборудование представлено сосредоточенными емкостями. В модели у подстанционного оборудования расположены блоки мониторинга состояния изоляции, фиксирующие выполнение условия нарушения её электрической прочности, что позволяет в сериях статистических расчетов определять вероятности возникновения повреждений.

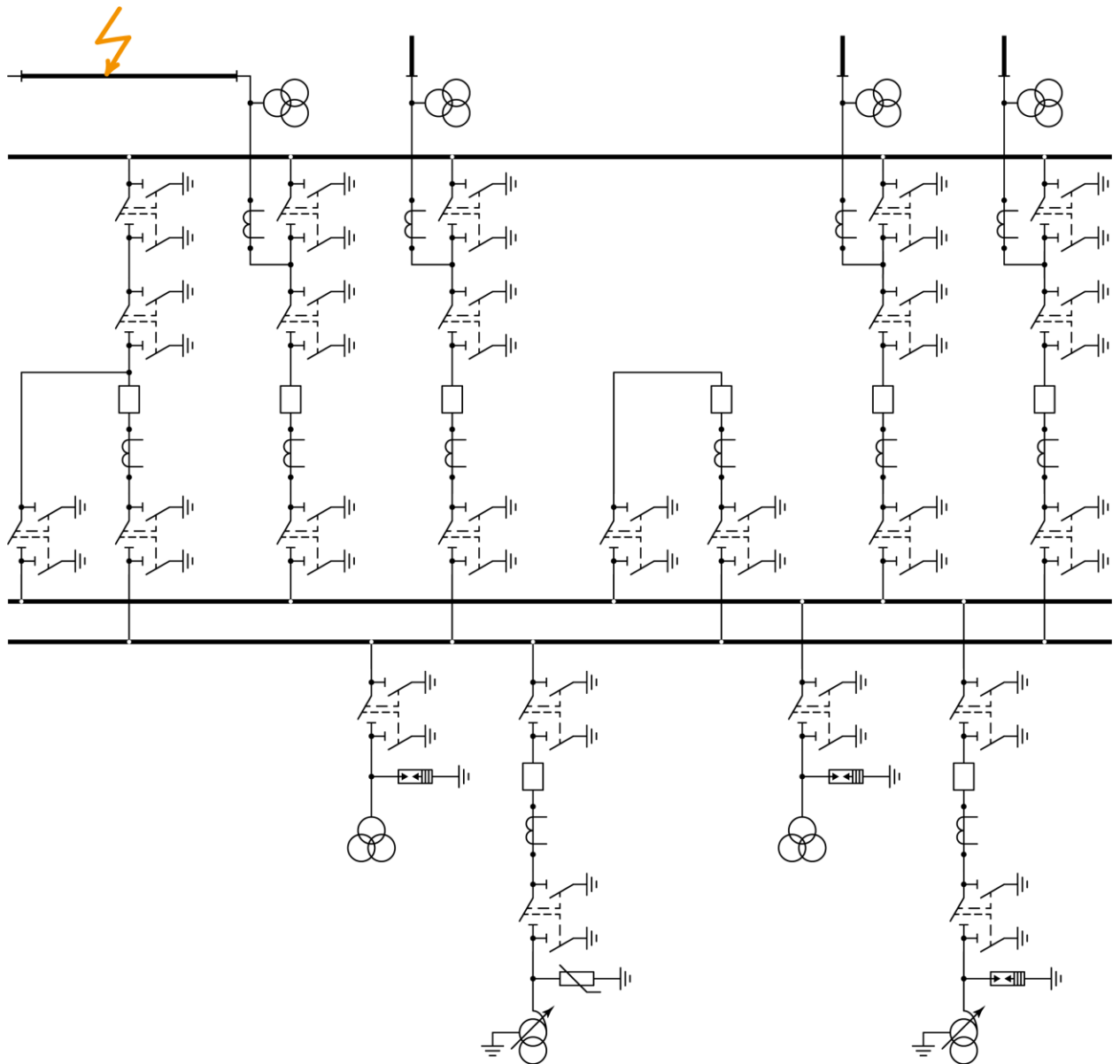


Рисунок 5 – Однолинейная схема ПС совместно с ВЛ

Отметим, что для решения не проектных, а исследовательских задач в программе имеется возможность задания силовых трансформаторов по детализированным высокочастотным схемам замещения. Это открывает возможность анализа перенапряжений, возникающих внутри трансформатора на участках главной и продольной изоляции.

Заключение

Разработана система автоматизированного проектирования молниезащиты ПС и ВЛ, включающая в себя методику проектирования, базу данных по типовым техническим решениям и программный комплекс, состоящий из ранее разработанных программ и нового ПО. Этот программный комплекс обеспечивает глубокую автоматизацию процесса

проектирования и отражает передовые достижения в области молниезащиты и численного моделирования импульсных перенапряжений при грозовых воздействиях. Авторы надеются, что в ближайшие годы эта разработка начнет широко применяться проектными организациями на основе лицензионного договора с ПАО «Россети Кубань» и ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Список литературы

1. Е.С. Колечицкий, Д.А. Матвеев. О нормативных документах по защите ПС от волн перенапряжений, набегающих с ВЛ // Третья Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург, 2012.
2. СТО 56947007-29.240.01.221-2016. Руководство по защите электрических сетей напряжением 110–750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений // ПАО «ФСК ЕЭС», 2016.
3. СТО 56947007-29.130.10.197-2015. Методические указания по применению ОПН на ВЛ 6–750 кВ // ОАО «ФСК ЕЭС», 2015.
4. Подход к численному моделированию грозовых перенапряжений в воздушных линиях электропередачи 110–750 кВ с подвесными ограничителями перенапряжений / Д.А. Матвеев, М.З. Гилязов // Энергетик, №12, 2011.
5. М.З. Гилязов, Д.А. Матвеев. Расчётное определение оптимальных схем расстановки ограничителей перенапряжений на одно- и двухцепных воздушных линиях электропередачи 110 кВ // Энергетик, №6, 2012.
6. М.З. Гилязов, Д.А. Матвеев, И.И. Никулов. Расчетное определение энергетических воздействий и повреждаемости ОПН, установленных на ВЛ // Энергетик, №9, 2012.
7. О.И. Богданова, М.З. Гилязов, Д.А. Матвеев, Б.И. Механошин. Комплексный подход к обеспечению грозоупорности ВЛ // Третья Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург, 2012
8. Б.В. Ефимов. Грозовые волны в воздушных линиях // Апатиты, 2000.
9. R.O. Caldwell and M. Darveniza, “Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Wave Shapes on the Impulse Strength of External Insulation”, IEEE Trans., Pwr App. and Syst., Vol. 92, pp. 1420–1428, 1973.
10. М.З. Гилязов, Д.А. Матвеев. Учет нестандартной формы воздействующих напряжений при расчете грозоупорности воздушных линий // Вестник Алматинского университета энергетики и связи - Материалы международной конференции «Энергетика

и устойчивое развитие: сотрудничество вузов и бизнеса в создании международных магистерских программ», №4 (15), 2011.

11. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. - 2-е изд. // СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.

12. Калугина И.Е., Гундарева С.В., Темников А.Г. Особенности методики расчета поражения молнией элементов воздушной линии электропередачи на основе вероятностного подхода." Труды VI Российской конференции по молниезащите, 2018, Санкт-Петербург, с. 134-141

13. И.Е. Калугина, С.В. Гундарева, А.Г. Темников. Методы исследования поражаемости наземных объектов молнией. Учебн. пособие: – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 60 с.