

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315.1

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32

СПОСОБЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА К ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия
minullin@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в расширении технических возможностей локационного мониторинга воздушных линий электропередачи путем разработки способа подключения к ним локационной аппаратуры при отсутствии стандартной высокочастотной обработки линий.

ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы подключения аппаратуры локационного мониторинга к грозотросу воздушной линий электропередачи для ввода зондирующего импульсного сигнала в высокочастотный тракт линий электропередачи, обеспечивая при этом условия электробезопасности системы. Провести сравнение эффективности работы локационного мониторинга при стандартном подключении локатора к фазному проводу через высокочастотную обработку линии и при подключении к грозотросу линии. Выполнить исследования условий локационного мониторинга линий электропередачи в различных режимах заземления грозотроса. Исследовать возможность работы локатора через грозотрос для обнаружения повреждений на линии, наблюдая сигнал, отраженный от места повреждения.

МЕТОДЫ. Поставленные задачи решались путем моделирования. Использовалась имитационная модель стандартной высокочастотной обработки воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ в программной среде PSCAD, в которой имеется возможность подключать аппаратуру локационного мониторинга к фазным проводам и к грозотросу. Это позволяет изучать распространение импульсных сигналов локатора по проводам и грозотросу линий электропередачи, наблюдая при этом взаимонаведенные сигналы на всех фазных проводах и на грозотросе.

РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье обоснована актуальность темы, рассмотрены особенности влияния различных режимов заземления грозотроса на эффективность локационного мониторинга линии. Произведено сравнение экспериментальных сигналов локационного мониторинга линий электропередачи при стандартном подключении локатора к фазному проводу через высокочастотную обработку линии с сигналами имитационной модели при подключении локатора к фазным проводам и к грозотросу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Внедрение технологии локационного мониторинга линий электропередачи с использованием грозотроса повысит надежность подстанций России и подстанций стран ближнего зарубежья. При этом за счет дополнительной организации локационного мониторинга на линиях электропередачи, не имеющих высокочастотной обработки, количество контролируемых подстанций будет значительно увеличено. Подстанции будут оснащены современной диагностической аппаратурой, не имеющей аналогов в мировой практике, в виде интеллектуальной локационной системы мониторинга линий электропередачи, повышающей бесперебойность их функционирования в экстремальных условиях, обеспечивая эффективное энергоресурсосбережение.

Ключевые слова: Воздушные линии электропередачи; локационный мониторинг линий; импульсное зондирование; высокочастотный тракт; локационный комплекс; подключение через грозотрос; электромагнитная связь; обнаружение места повреждения линии; обрыв провода; короткое замыкания провода.

Для цитирования: Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А. Способы подключения аппаратуры локационного мониторинга к воздушным линиям электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 16-32. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.

CONNECTING METHODS OF LOCATION MONITORING EQUIPMENT TO OVERHEAD POWER LINES

Minullin R.G., Granskaya A.A., Abdullazyanov E.Yu., Akhmetova I.G., Mustafin R.G., Kasimov V.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
minullin@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the research lies in expanding the technical capabilities of location monitoring of overhead power lines by developing a method for connecting location equipment to them in the absence of standard high-frequency processing of lines. *TARGET.* Consider the problems of connecting location monitoring equipment to the lightning arrester cable of overhead power lines to input a probing pulse signal and observe reflected signals, while ensuring the electrical safety conditions of the system. Compare the efficiency of location monitoring with a standard connection of the locator to a phase wire through high-frequency processing of the line and when connected to a line lightning arrester cable. Carry out a study of the conditions for location monitoring of power lines in various grounding modes of the lightning arrester cable. Investigate the possibility of operating a locator through a lightning arrester cable to detect faults on the line by observing the signal reflected from the fault location. *METHODS.* The assigned tasks were solved by modeling. A simulation model of standard high-frequency processing of overhead power lines with a voltage of 35–750 kV was used in the PSCAD software environment. The model has the ability to connect location monitoring equipment to phase wires and lightning arrester cable, and record signals both at the beginning and at the end of the power line. By exciting a pulse signal in one wire of the line, due to inductive coupling, the signals propagate along all phase wires and the lightning arrester cable. *RESULTS.* The article substantiates the relevance of the topic and examines the features of the influence of various grounding modes of the lightning arrester cable on the efficiency of location monitoring of the line. A comparison was made of the experimental signals of location monitoring of power lines, with a standard connection of the locator to a phase wire through high-frequency processing of the line, with the signals of a simulation model when connecting the locator to phase wires and to a lightning arrester cable. *CONCLUSION.* The introduction of technology for location monitoring of power lines using lightning arrester cable will increase the reliability of substations in Russia and substations in neighboring countries. At the same time, due to the additional organization of location monitoring on power lines that do not have high-frequency processing, the number of controlled substations will be significantly increased. The substations will be provided with modern diagnostic equipment, in the form of an intelligent location system for monitoring power lines, which increases the uninterrupted operation of their operation under normal and extreme operating conditions.

Keywords: Overhead power lines; location monitoring of lines; pulse sensing; high frequency path; location complex; connection via lightning arrester cable; electromagnetic communication; detection of line fault location; wire break; wire short circuit.

For citation: Minullin R.G., Granskaya A.A., Abdullazyanov E.Yu., Akhmetova I.G., Mustafin R.G., Kasimov V.A. Connecting methods of location monitoring equipment to overhead power lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 16-32. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.

Введение (Introduction)

В настоящее время во многих странах мира ведутся исследования и разработки по созданию интеллектуальных электрических сетей (*Smart Grid*), которые автоматически обнаруживают опасные участки сети и принимают меры для предотвращения аварий и снижения материальных потерь. Интеллектуальная сеть представляет собой самоуправляемую энергетическую систему с минимальным участием человека. Основной проблемой в таких случаях для принятия решений является достоверность информации о режимах работы энергосистемы. Для этого используются различные методы и приборы для определения типа и места возможной аварии [1].

Высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП), имеющие большую протяженность, являются наименее надежными элементами энергосистемы. Основная часть повреждений линий – это короткие замыкания и обрывы проводов из-за природных, техногенных и антропогенных воздействий [2].

Значительная часть повреждений ЛЭП в виде обрывов проводов и поломки опор обусловлена гололедно-ветровыми воздействиями, они составляют для России около 20 % от общего количества повреждений [3].

Если гололедно-ветровые аварии имеют редкий, но массовый характер, то повреждения проводов ЛЭП происходят довольно часто. Затраты средств на определение места повреждения (ОМП) составляют значительную часть эксплуатационных издержек в электросетях и приносят огромные финансовые потери. ОМП является наиболее сложной и относительно длительной технологической операцией при восстановлении поврежденных участков сети [3].

В этой ситуации мониторинг состояния ЛЭП и предупредительные меры по предотвращению возможных аварий на воздушных линиях становятся весьма актуальными. Поэтому подстанции воздушных ЛЭП оснащаются системами их мониторинга, повышающими надежность ЛЭП и обеспечивающими бесперебойность энергоснабжения промышленных предприятий, а также населения.

Применяемые в настоящее время метод обнаружения повреждений проводов ЛЭП по параметрам аварийного режима (ПАР) и волновой метод являются сложными и не очень надежными методами контроля состояния проводов ЛЭП [4, 5].

Прекращение их функционирования из-за отключения сетевого напряжения во время аварии в течение 0,2 с не дает возможности осуществлять непрерывный мониторинг технического состояния ЛЭП, что крайне важно, особенно при аварийных случаях. Кроме того, если измерения методом ПАР или волновыми методами в течение 0,2 с до отключения сетевого напряжения системами релейной защиты оказались неудачными, то повторить эти измерения уже невозможно [6, 7].

Разрабатываемый в течение 28 лет в Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ) локационный метод мониторинга ЛЭП позволяет в настоящее время решить озвученные выше проблемы [8].

Локационный метод мониторинга обеспечивает надежный автоматический контроль состояния всех фазных проводов и грозозащитных тросов ЛЭП, отходящих с одной подстанции, при существовании рабочего напряжения на проводах линии и при его отсутствии благодаря наличию собственного генератора зондирующих импульсов [8, 9].

Метод обеспечивает оперативное обнаружение обрывов и всех видов коротких замыканий (КЗ) проводов с указанием расстояния до места повреждения и его вида. Обнаружение повреждений проводов ЛЭП определяется по появлению дополнительного отраженного импульса: с сохранением полярности при обрыве проводов и при изменении полярности при их коротком замыкании [10, 11].

Исследования и разработки многофункциональной системы локационного панорамно-визуального мониторинга состояния проводов воздушных ЛЭП, которые ведутся в КГЭУ, уникальны и не имеют аналогов в мире согласно информационному поиску глубиной в 50 лет.

Материалы и методы (Materials and methods)

Локационное зондирование заключается в подаче в линию импульсного сигнала и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлениях после отражения от конца линии или от места возникшего повреждения линии [8, 12, 13].

Метод локационного зондирования технически реализуется с помощью прибора, который называется рефлектометром, функциональная схема которого представлена на рисунке 1 [8, 14, 15].

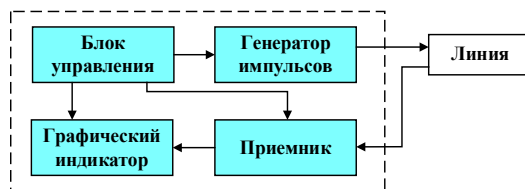


Рис. 1. Функциональная схема импульсного рефлектометра Fig.1. Functional diagram of a pulse reflectometer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Во время зондирования импульсы с генератора импульсов рефлектометра подаются в контролируемую линию. Отраженные импульсы поступают с линии в приемник. С выхода приемника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки рефлектометра функционируют по сигналам блока управления [8].

На графическом индикаторе воспроизводится рефлектограмма линии – изображения отраженных импульсов на временной оси как реакция неоднородностей линии на зондирующий импульс. Локационный мониторинг ЛЭП позволяет в дистанционном режиме отслеживать (как бы «видеть») состояние контролируемых линий с рабочего места диспетчера без выезда на трассу за счет визуализации существующей ситуации на мониторе диспетчерского пункта [16, 17]. Осуществляется своеобразное «Дистанционное зрение».

Для локационного зондирования ЛЭП используется его высокочастотный тракт, предназначенный для передачи технологической информации в виде сигналов аппаратуры релейной защиты, телемеханики, противоаварийной автоматики и телефонии (аппаратура связи) [18].

Схема подключения локатора (локационного устройства) с аппаратурой связи (АС) к фазному проводу ЛЭП через фильтр присоединения (ФП) с конденсатором связи (КС) и состав оборудования высокочастотной (ВЧ) обработки тракта в виде высокочастотного заградителя (ВЗ) показаны на рисунке 2 [18].

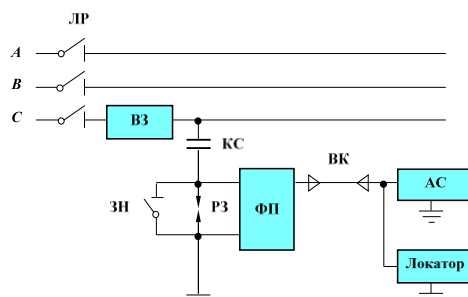


Рис. 2. Схема подключения аппаратуры связи и локационного устройства к проводам линии электропередачи по схеме «фаза-земля»: ЛР – линейный разъединитель; ВЗ – высокочастотный заградитель; КС – конденсатор связи; ЗН – заземляющий нож; РЗ – разрядник; ФП – фильтр присоединения; ВК – высокочастотный кабель; АС – аппаратура связи; локатор – локационное устройство; А, В, С – фазные провода ЛЭП

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Были выполнены локационные измерения на действующей ЛЭП «Рыбная Слобода – Камская» по обнаружению короткого замыкания проводов при подаче зондирующего импульса в линию через систему высокочастотной обработки.

Реализованная в настоящее время система локационного мониторинга ЛЭП с подключением локатора (рефлектометр РЕЙС-205) к линии «Рыбная Слобода – Камская» при использовании стандартной ВЧ обработки линии условно представлена на рисунке 3, а [8].

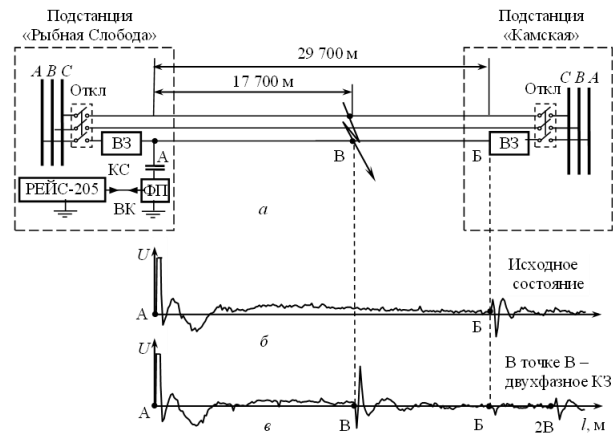


Рис. 3. Подключение рефлектометра к линии через ВЧ канал к проводу фазы А: а – схема линии с ВЧ обработкой; б – реальная рефлектограмма линии в исходном состоянии; в – реальная рефлектограмма линии при двухфазном КЗ на расстоянии 17 700 м

Fig.3. Connecting the reflectometer to the line through the HF channel to the wire of phase A: а – diagram of the line with HF processing; б – real reflectogram of the line in the initial state; в – real reflectogram of the line with two-phase short circuit at a distance of 17,700 m

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При этом зондирующий импульс рефлектометра подается через фильтр присоединения и конденсатор связи на провод фазы А и отражается в конце линии в точке В. Рефлектограмма, соответствующая этому случаю, показана на рис. 3, б.

Как видно на рис. 3, в, созданное повреждение линии в виде двухфазного замыкания проводов фаз А и С было обнаружено при локационном зондировании по отраженному импульсу на проводе фазы А на расстоянии 17 700 м в точке В, причем в точке 2В на расстоянии 35 400 м был виден импульс кратного отражения.

Сигнал, отраженный от места замыкания в точке В, был меньше исходного сигнала рефлектометра РЕЙС-205 на 40 дБ и надежно обнаруживался на рефлектограмме рис. 3, в.

Измерения выполнялись на действующей линии «Рыбная Слобода – Камская», поэтому провода линии на подстанциях были согласно требованиям правил техники безопасности отключены от сетевого напряжения с помощью линейных разъединителей (рис. 3, а).

Выполненные модельные исследования на ЛЭП 35 – 750 кВ [8] показывают, что чувствительность современных рефлектометров РЕЙС-405 [15] достаточна для обнаружения импульсов, отраженных от места повреждения проводов, на линиях длиной до 150 км при их затухании за счет расстояния и гололедных отложений до 100 дБ.

К сожалению, не все ЛЭП имеют ВЧ обработку. Ее отсутствие не позволяет организовать локационный мониторинг состояния проводов ЛЭП.

В связи с этим предлагается осуществлять локационные измерения на воздушных ЛЭП путем подключения локатора (рефлектометра) к грозозащитному тросу для ввода в провода ЛЭП зондирующего импульсного сигнала.

На воздушных ЛЭП 35–750 кВ основным назначением грозозащитных тросов является защита фазных проводов от прямых разрядов молнии, способных привести к перекрытию изоляции и возникновению коротких замыканий (КЗ).

Предлагаемый метод не является всеобъемлющим. Он может применяться в случае, если грозотросы используются для устройства каналов ВЧ связи или для плавки гололеда.

Согласно ПУЭ¹ «При использовании тросов для устройства каналов высокочастотной связи они изолируются от опор на всем протяжении каналов высокочастотной связи и заземляются на подстанциях и усилительных пунктах через высокочастотные заградители. Если на тросах ВЛ предусмотрена плавка гололеда, то изолированное крепление тросов выполняется по всему участку плавки. В одной точке участка плавки тросы заземляются с помощью специальных перемычек».

«Как видно, в случаях использования троса для ВЧ связи или плавки гололеда ПУЭ разрешают не делать заземление троса. При этом не говорится о каком-либо «ухудшении грозоупорности» самой ВЛ или конечных распределительных устройств (РУ), не требуется никаких мероприятий, которые позволили бы компенсировать «ухудшение грозоупорности» ВЛ или конечных РУ, например за счет установки дополнительных ограничителей перенапряжений (ОПН) на входе в РУ или на сборные шины РУ» [19].

¹ Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд.. п. 2.5.122. Утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

Рассматриваемые в статье технические решения применяются для ВЧ трактов, выполненных по схеме «трос-земля» и «трос-трос», должны быть экономически обоснованы и используются для облегчения электромагнитной обстановки. При этом ЛЭП предполагают наличие проводящего грозозащитного троса, а на таких линиях не предусматривается прокладка волоконно-оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос.

Еще одним документом, в котором затронуты вопросы крепления грозозащитных тросов, является стандарт², согласно которому необходимо выполнять следующее условие: «Проектирование подвеса оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос (ОКГТ) на ВЛ 110 кВ и выше должно проводиться с заземлением ОКГТ на каждой опоре. По требованию заказчика (либо эксплуатирующей организации) крепление ОКГТ может быть выполнено через изолятор и с заземлением через шунтирующий проводник. Возможно использование следующей схемы: в анкерном пролете на одной анкерной опоре с заземлением, на второй анкерной опоре и на всех промежуточных – с изолированным креплением ОКГТ и заземлением через искровые промежутки; при плавке гололеда на ЛЭП – с изолированным креплением ОКГТ».

Для проверки предложения о возможности использования грозотроса при зондировании ЛЭП было выполнено имитационное моделирование высокочастотного тракта воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ в программной среде PSCAD.

При этом в первую очередь было необходимо установить достаточность энергетики зондирующего импульса, наведенного с грозотроса в ВЧ тракт линии электропередачи, для его обнаружения современной измерительной аппаратурой после отражения от места повреждения провода линии и последующего электромагнитного наведения на грозотрос.

При моделировании ВЧ тракта ЛЭП были использованы следующие основные компоненты:

- резисторы, индуктивности, конденсаторы (вкладка Passive Elements);
- трансформаторы (вкладка Transformes);
- частотнозависимые кабельные линии электропередачи (вкладка Cables);
- генераторы сигналов (вкладка Sources);
- осциллографы (вкладка I/O devices).

В качестве имитационной модели был выбран ВЧ тракт, организованный по фазным проводам ЛЭП напряжением 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» с соответствующим грозотросом. На рис. 4 изображена модель этой линии в среде PSCAD.

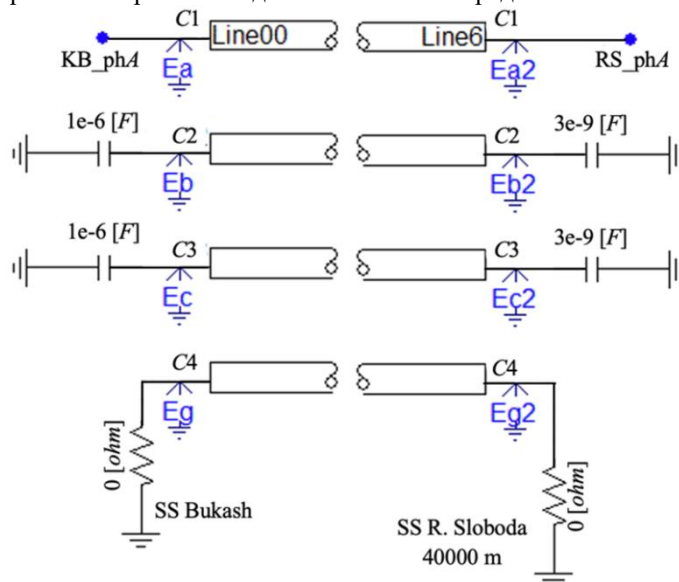


Рис. 4. Модель линии электропередачи «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в среде PSCAD

Fig.4. Model of the power transmission line "Kutlu Bukash – Rybnaya Sloboda" in the PSCAD environment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Схема высокочастотного тракта начинается с генератора прямоугольных видеоимпульсов и кончается «устройством присоединения», смоделированным нагрузкой величиной 75 Ом.

² СТО 56947007-33.180.10.172-2014. Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. М., 2014.

Модель линии электропередачи «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в среде PSCAD содержит емкости $C1$, $C2$, $C3$ у проводов фаз A , B , C и емкость $C4$ – у грозотроса, который заземлен на каждой анкерной опоре. К ВЧ кабелю в точках $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ подключены виртуальные осциллографы Ea , Eb , Ec , Eg , которые позволяют записывать зондирующий и отраженные сигналы с заданным временным шагом для построения рефлектограммы. Аналогично виртуальные осциллографы $Ea2$, $Eb2$, $Ec2$, $Eg2$ подключены в конце линии. Виртуальные осциллографы при моделировании позволяют выполнить «измерение» в любой точке электрической схемы. Точка KB_phA является точкой подключения рефлектометра через ВЧ обработку. Точка RS_phA является точкой подключения ВЧ обработки в конце линии.

Рефлектометр смоделирован в виде генератора импульсов (Range Comparator), который является стандартным компонентом из библиотеки компонентов PSCAD – однофазный источник (single phase sources). Данный генератор позволяет получать одиночный видеоимпульс заданной длительности и амплитуды.

В нашем случае заданы следующие основные параметры генератора импульсов: время начала генерации импульса – 0 с; длительность импульса – 2 мкс; амплитуда импульса – 1 В; выходное сопротивление – 100 Ом.

Для упрощения модельных расчетов амплитуда генератора импульсов принята равной 1 В, так как в данном случае важны величины ослабления отраженных сигналов и их соотношения между собой. В реальных ситуациях выходные сигналы рефлектометров в условиях помех на проводах ЛЭП достигают 100 В, а усиление сигналов составляет 80 дБ.

Электрическая схема подключения рефлектометра через ВЧ кабель к устройству присоединения в среде PSCAD представлена на рис. 5.

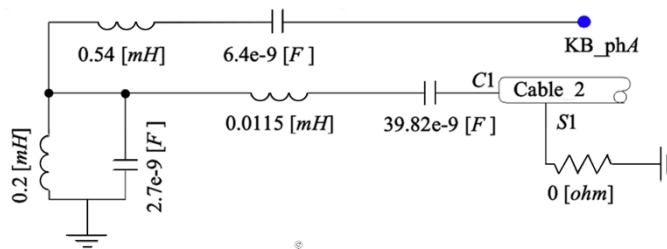


Рис. 5. Электрическая схема подключения ВЧ кабеля к фильтру присоединения в среде PSCAD Fig. 5. Electrical diagram for connecting the RF cable to the connection filter in the PSCAD environment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Устройство присоединения, как было показано выше (рис. 2), состоит из высокочастотного кабеля, фильтра присоединения и конденсатора связи. Высокочастотный кабель РК-75 (Cable_2 на рис. 5) является стандартным компонентом из библиотеки кабелей (cables) в виде коаксиального кабеля.

Основными параметрами, задаваемыми при модельном расчете для данного компонента, являются:

- 1) длина высокочастотного кабеля – 250 м;
- 2) радиус токоведущей жилы – 0,75 мм;
- 3) радиус изоляционного слоя – 5 мм;
- 4) радиус защитной оболочки – 6,5 мм;
- 5) удельное сопротивление жилы $1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;
- 6) удельное сопротивление земли 100 Ом·м;
- 7) частотный диапазон до 10^8 Гц.

Высокочастотный кабель подключается к фильтру присоединения в среде PSCAD, как показано на рисунке 5.

Фильтр присоединения выполняет следующие функции: компенсирует реактивное сопротивление конденсатора связи на рабочих частотах; заземляет нижнюю обкладку конденсатора связи на частоте 50 Гц; служит согласующим элементом между ВЧ кабелем и линейным трактом ЛЭП.

На проводе фазы C ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» установлен фильтр присоединения ФП 6 400/36-255 кГц, схема замещения которого представлена на рисунке 6.

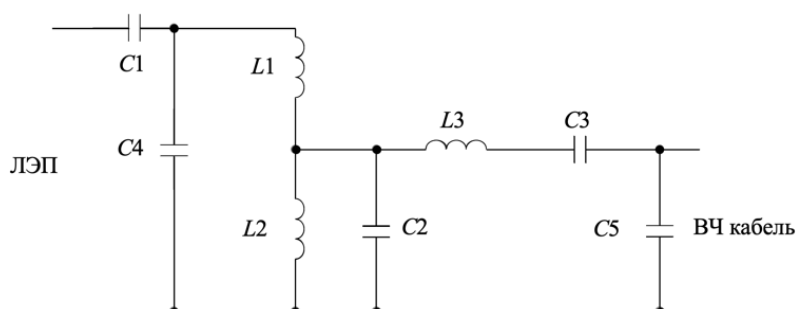


Рис. 6. Электрическая схема фильтра присоединения ФП 6400/36-255 кГц Fig. 6. Electrical circuit of the FP connection filter 6400/36-255 kHz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Параметры элементов схемы замещения фильтра присоединения приведены в таблице, они используются из базы данных программы WinTrakt. Конденсатор связи СМВ-110/ $\sqrt{3}$ -6.4 У1 представлен емкостью $C_1 = 6\,400$ пФ.

Таблица

Table

Параметры элементов электрической схемы фильтра присоединения ФП 6 400/36-255 кГц

Parameters of the circuit diagram elements of the connection filter FP 6 400/36-255 kHz

Емкости (пФ)		Индуктивности (мГн)	
C1	64 00	L1	2,27
C2	1 500	L2	0,24
C3	69 000	L3	0,036

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Фазные провода ЛЭП и грозотрос образуют линейный ВЧ тракт. Если ЛЭП является двухцепной, то учитываются фазные провода и второй цепи.

Провода линии электропередачи представлены в виде коаксиального кабеля с нулевой толщиной изоляционного слоя и защитной оболочки, хотя программная среда PSCAD имеет стандартные библиотеки для воздушных линий Tline (Line00, Line6 на рис. 4).

Такой выбор модели обусловлен следующими соображениями: во-первых, это позволяет моделировать гололёдные отложения на проводе линии, добавив диэлектрик гололёдного отложения; во-вторых, в данной модели можно отдельно задавать сечение сердечника по стали и по алюминию для стале-алюминиевого провода.

ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в рассматриваемой модели представлена элементом Line00 (рис. 4).

Основными параметрами, задаваемыми для данного компонента, являются:

- 1) длина воздушной линии – 40 000 м;
- 2) расположение проводов по вертикали относительно земли и по горизонтали;
- 2) радиус стального сердечника – 3,45 мм;
- 3) радиус алюминиевого повива – 12,4 мм;
- 4) радиус изоляционного слоя – 12,4 мм;
- 5) удельное сопротивление провода и грозотроса – $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;
- 6) удельное сопротивление земли 100 Ом·м;
- 7) частотный диапазон до 10^8 Гц.

Входное сопротивление подстанции по концам ВЧ тракта на фазных проводах, к которым не подключены элементы ВЧ обработки и локатор, задается эквивалентной емкостью, величина которой определяется в соответствии с рекомендациями, изложенными в [20].

На всех последующих рисунках рефлектограмм, полученных при модельных расчетах в программной среде PSCAD, по горизонтальной оси отложены расстояния в метрах до неоднородностей, которые создают отраженные импульсы. Расстояния определены с использованием скорости распространения электромагнитной волны $C = 3 \cdot 10^8$ м/с без корректировки на реальную скорость электромагнитной волны вдоль проводов воздушных ЛЭП. По вертикали на рисунках рефлектограмм отложены амплитуды измеренных сигналов в вольтах.

Результаты (Results)

Первый модельный эксперимент был поставлен для определения с использованием имитационной модели ЛЭП в среде PSCAD степени электромагнитного влияния на фазные провода ЛЭП неоднородности волнового сопротивления грозотроса при локационном зондировании фазного провода через систему ВЧ обработки.

Схема подключения рефлектометра и полученные при этом рефлектограммы представлены на рисунке 7.

Для «измерений» на грозотросе была создана неоднородность путем замыкания грозотроса на землю на расстоянии 3 300 м от начала линии через первую анкерную опору в точке В. Рефлектометр к грозотросу не был подключен, он был подключен к проводу фазы А через стандартную ВЧ обработку. Входное сопротивление подстанции на конце подключенного провода фазы А было задано эквивалентной емкостью С1. Для ввода зондирующих импульсов в ЛЭП использовался участок линии менее 10% от существующей линии в 40 000 м.

Были рассчитаны рефлектограммы на проводах фаз А, В, С при подключении рефлектометра к проводу фазы А.

При зондировании импульс на проводе фазы А отразился от ее конца в точке Б на расстоянии 40 000 м (рис. 7, б) и был равен 0,08 В. Зондирующий импульс с провода фазы А за счет электромагнитной связи навился на провода фаз В и С, отразившись от их концов в точках Б (рис. 7, в и г). Сигналы, которые отразились на концах проводов фаз В и С в точках Б имеют большую амплитуду, чем их исходные сигналы в точках А, т. к. являются результатом сложения импульсов, отраженных от эквивалентных емкостей, и наведенных переотраженных импульсов со всей линии.

Часть энергии зондирующего импульса А навилась на грозотрос и, распространяясь по нему, отразилась от места его замыкания на землю через анкерную опору в точке В на расстоянии 3 300 м (описываемый процесс на схеме не показан). Отраженный импульс В на грозотросе вернулся к его началу, отразился от его разомкнутого конца и опять распространяясь к месту замыкания грозотроса на землю в точке В, отразился там в виде импульса 2В (образовался первый кратный импульс). Затем этот импульс 2В снова направился к началу грозотроса, отразился там и распространялся опять к месту замыкания грозотроса на землю в точке В, отразился там в виде импульса 3В (образовался второй кратный импульс). Таким образом этот сигнал многократно переотражался при его распространении по грозотросу на участке АВ в виде кратников 2В, 3В и т. д., уменьшаясь по амплитуде до полного затухания импульса.

Электромагнитное поле, создаваемое на грозотросе кратными импульсами В, 2В, 3В, наводило на фазные провода А, В, С с соответствующими импульсами, обозначенными пунктирными контурами на рисунках 7, б, в, г, которые регистрировались виртуальными осциллографами Еа, Еб, Ес.

Наведенные импульсы на фазных проводах В и С (рис. 7, в и г) были не велики по амплитуде и составляли сотые доли милливольт. При этом выходной зондирующий импульс рефлектометра был равен 1 В (на рис. 7, б импульс по амплитуде ограничен графически). Ослабление наведенных переотраженных импульсов В при регистрации их на фазных проводах В и С достигло 80 дБ. Но импульсы могли быть явно и надежно обнаружены современными рефлектометрами, имеющими диапазон усиления в пределах до 100 дБ [15].

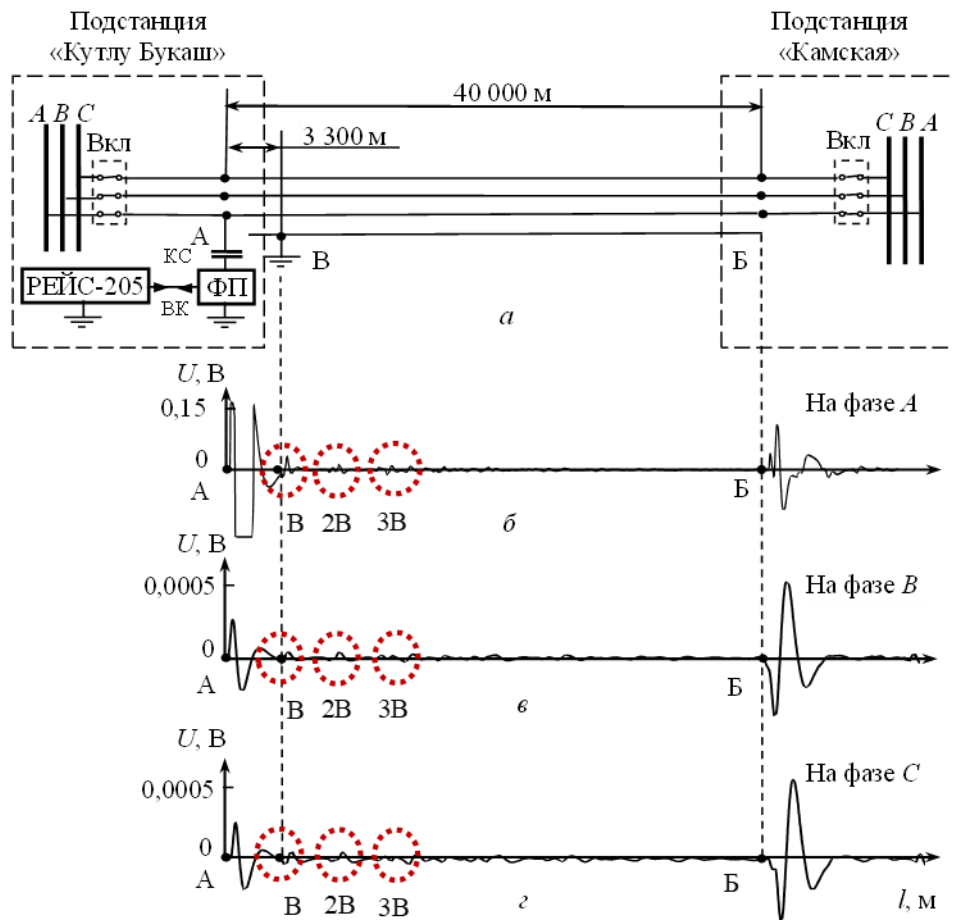


Рис. 7. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к проводу фазы А штатным способом через ВЧ обработку линии; а – схема подключения рефлектометра к линии; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно

Fig.7. Simulation results when connecting the reflectometer to the phase A wire in the standard way through RF processing of the line; а – diagram of connecting the reflectometer to the line; б, в, г – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, видно, что при локационном мониторинге ЛЭП состояние грозотроса (наличие замыкания на землю) влияет на фазные провода, находящиеся рядом с ним, в виде наведенных и переизлученных импульсов, которые могут быть обнаружены современной измерительной аппаратурой. Следовательно, зондирующие импульсы могут быть введены с грозотроса в фазные провода для контроля их состояния с регистрацией обратных переизлученных импульсов, указывающих место повреждения на линии.

Второй модельный эксперимент был посвящен анализу работы схемы мониторинга состояния проводов ЛЭП при их локационном зондировании с использованием грозотроса. В этом случае зондирующий импульс подается через фильтр присоединения и конденсатор связи непосредственно в провод грозотроса, как это представлено на рисунке 8.

Фильтр присоединения и конденсатор связи присутствуют в данном случае для обеспечения техники безопасности обслуживающему персоналу и уменьшения диапазона ВЧ помех.

Грозотрос, как и в первом эксперименте, заземлен на расстоянии 3 300 м через анкерную опору в точке В (рис. 8, а).

При зондировании исходный импульс через грозотрос наводится на провода фаз А, В, С с отражением в точках Б на концах линий на расстоянии 40 000 м, что хорошо видно на соответствующих рефлектограммах рис. 8, б, в, г.

В то же время заземление грозотроса в точке В на расстоянии 3 300 м, как и в первом эксперименте, порождает на грозотросе отраженный импульс в точке В с кратными импульсами 2В, 3В и так далее (рис. 8, д). Амплитуды первых трех отраженных импульсов, регистрируемых на расстояниях до 10 000 м, на графике (рис. 8, д) ограничены графически для соразмерности с амплитудами других импульсов.

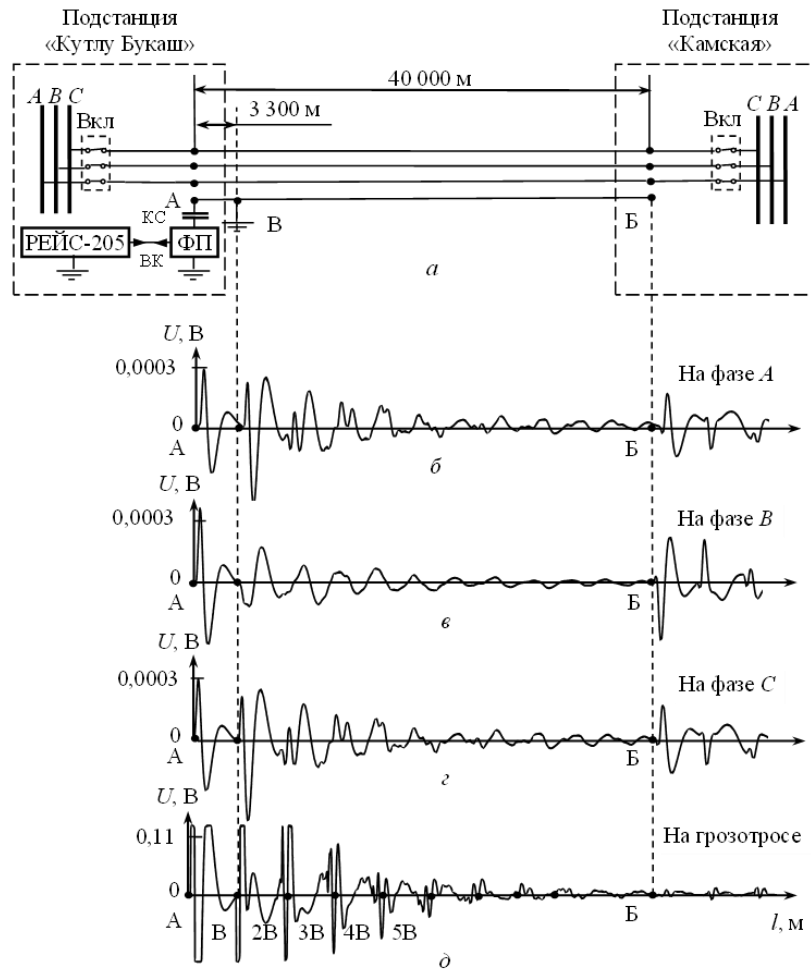


Рис. 8. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии при заземлении грозотроса на первой анкерной опоре: а – схема подключения рефлектометра через фильтр присоединения к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжение на грозотросе

Fig. 8. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line when the lightning arrester cable is grounded on the first anchor support: а – diagram of connecting the reflectometer through the connection filter to the lightning arrester cable; б, в, г – voltages on the wires of phases А, В and С, respectively; д – voltage on the lightning arrester cable

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В данном случае при непосредственном присоединении рефлектометра к грозотросу амплитуды кратных импульсов 2В, 3В и других на грозотросе на несколько порядков выше, чем при первом эксперименте, как это показано на рисунке 8, д. Поэтому наведенные ими импульсы на проводах фаз А, В, С также значительно выше, чем в первом эксперименте, как это видно на соответствующих рефлектограммах (рис. 8, б, в, г) при сравнении с рефлектограммами рис. 7, б, в, г. Согласно рефлектограммам (рис. 8, б, в, г) наведенные импульсы соразмерны по амплитуде с импульсами, отраженными от концов фазных проводов в точках Б и используемых при процедуре мониторинга ЛЭП.

Ослабление переотраженных импульсов, наведенных на фазные провода А, В, С (рис. 8, б, в, г) составляет примерно 60 дБ, что соизмеримо с затуханием отраженных импульсов при локационном мониторинге ЛЭП с использованием для зондирования ВЧ тракта [8].

Поэтому можно считать, что импульсы на фазных проводах А, В, С, переотраженные при замыкании грозотроса на землю, вполне энергообеспечены при его использовании для ввода зондирующих импульсов в линию при локационном мониторинге.

Но при использовании для зондирования только небольшого участка линии с заземлением в начале грозотроса исчезает возможность контроля участков линии, которые находятся далее места заземления. Ибо при этом импульс на грозотросе, многократно отражаясь на этом участке, постепенно затухает, не достигая конца линии (рис. 8, д). То же самое происходит с наведенными импульсами на фазных проводах А, В, С (рис. 8, б, в, г).

Третий модельный эксперимент проводился в исполнении схемы линий, при котором грозотрос контролировался по всей длине при заземлении его конца на последней опоре линий, как это показано на рис. 9, а.

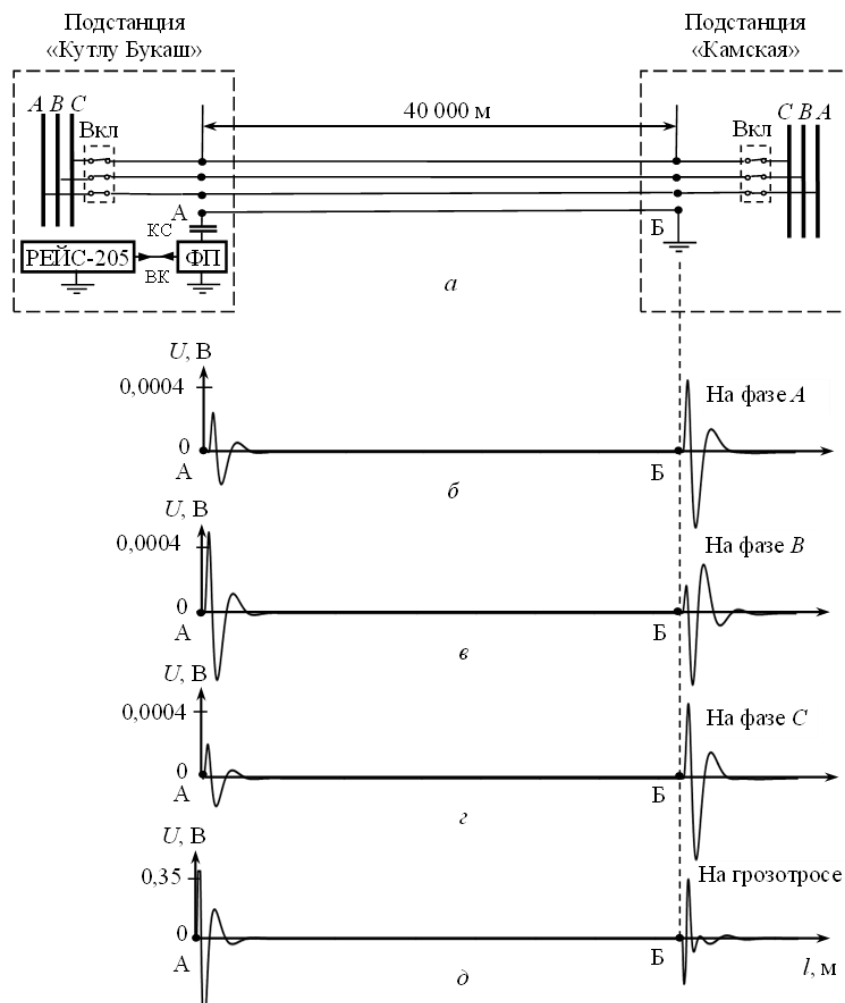


Рис. 9. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии и заземлении грозотроса в конце линии: а – схема подключения рефлектометра через фильтр присоединения к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжение на грозотросе

Fig.9. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line and grounding the lightning arrester cable at the end of the line: а – diagram of connecting the reflectometer through the connection filter to the lightning arrester cable; б, в, г – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively; д – voltage on the lightning arrester cable

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Амплитуда исходного зондирующего импульса в этом случае в начале грозотроса была равна примерно 0,35 В (рис. 9, д). В начале фазных проводов амплитуды наведенных импульсов находились в интервале 0,0002 – 0,0004 В. Амплитуды наведенных импульсов, отраженных от концов фазных проводов линии на расстоянии 40 000 м в точках Б, превышали эти значения, как это следует из рис. 9, б, в, г.

Величина наведенных исходных зондирующих импульсов вполне достаточна для контроля состояния фазных проводов ЛЭП с использованием современной измерительной аппаратуры, как было показано выше в предыдущем эксперименте. При этом импульсы с первым положительным всплеском, отраженные от концов линий в точках Б на проводах фаз А, В, С, наблюдаются явно и однозначно регистрируются современным рефлектометром РЕЙС-205 на емкостных нагрузках фазных проводов (рис. 9, б, в, г). Импульс, отраженный от конца заземленного грозотроса, имеет первый всплеск отрицательной полярности.

Четвертый модельный эксперимент был проведен для обнаружения места повреждения в виде однофазного замыкания провода на землю. Рефлектометр РЕЙС-205

был подключен к началу грозотроса через фильтр присоединения и конденсатор связи, как представлено на рис. 10, а.

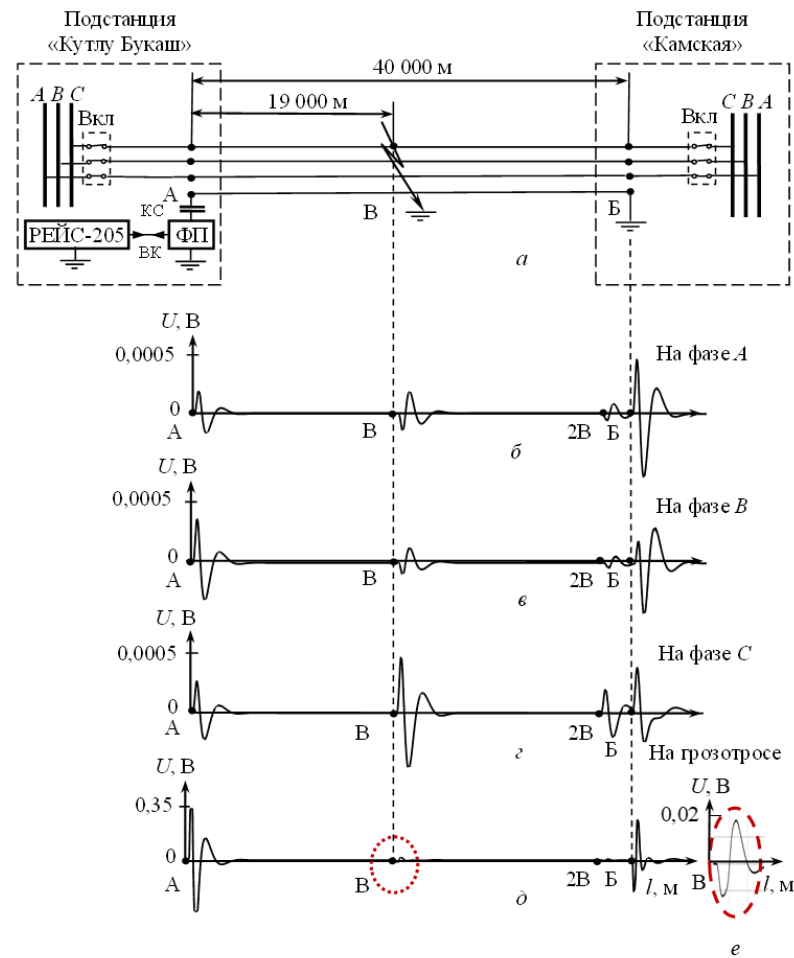


Рис. 10. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии при замыкании провода фазы С на землю: а – схема подключения рефлектометра к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжения на грозотросе; е - растяжка импульса с грозотроса, соответствующего месту короткого замыкания провода фазы С на землю в середине линии в точке В

Fig.10. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line when the phase C wire is shorted to ground: а – diagram of connecting the reflectometer to the line through the HF channel to the lightning arrester cable; b, c, d – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively; d – voltage on the lightning arrester cable; e - signal stretching from the lightning arrester cable reflected from the short circuit of the phase C wire to the ground in the middle of the line at point B

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Грозотрос в конце линии в точке В был заземлен, что обусловило отраженный импульс с первым всплеском отрицательной полярности (рис. 10, д). Фазные провода на концах имели емкостную нагрузку (рис. 10, б, в, г), как во время третьего эксперимента (рис. 9, б, в, г).

Во время данного эксперимента провод фазы С был заземлен в точке В на расстоянии 19 000 м от начала линии, как показано на рисунке 10, а.

Амплитуда исходного зондирующего импульса в начале грозотроса была равна 0,35 В (рис. 10, д). Амплитуда импульса на грозотросе при отражении от места замыкания в точке В, составила 0,02 В (на рис. 10, е обозначено штриховым овалом). Затухание отраженного импульса при этом равнялось примерно 40 дБ относительно импульса рефлектометра с амплитудой в 1 В. Это соответствует уровню затухания отраженного импульса при подобном локационном зондировании линии с использованием ВЧ обработки (рис. 3). Импульс, отраженный от места замыкания провода линии, при регистрации его рефлектометром РЕЙС-205 (рис. 10, е) обнаруживается также явно и надежно, как при такой же регистрации в случае использования ВЧ обработки для ввода импульса в линию (рис. 3, в).

Значительно меньшие сигналы, соответствующие месту замыкания, были наведены в точках В на проводах фаз А и В (рис. 10, б и в). Причем отраженный от места замыкания сигнал на проводе фазы С был больше их (рис. 10, г). Около конца линии на расстоянии 38 000 м на фазных проводах А и В наблюдались кратные импульсы 2В, соответствующие по отрицательной полярности первого всплеска основным отраженным импульсам в точках В (рис. 10, б и в).

Таким образом, подключая локаатор к грозотросу в начале линии, можно наблюдать устойчивые отраженные сигналы, как от конца линии, так и от места повреждения на фазном проводе с помощью современных рефлектометров [15].

Обсуждение (Discussions)

Сравнение эффективности обнаружения повреждения провода ЛЭП предлагаемым методом ввода зондирующего импульса в ВЧ тракт через грозотрос (рис. 10) и методом его ввода с использованием ВЧ обработки ЛЭП (рис. 3) показывает их сопоставимую чувствительность. Поэтому метод ввода зондирующего импульса через грозотрос может успешно использоваться при мониторинге воздушных высоковольтных линий электропередачи.

Назначением грозотроса, согласно его названию, является защита фазных проводов ЛЭП от поражения молнией. Поэтому при подключении локаатора к грозотросу всегда потребуется какой-то аналог ВЧ обработки, направленный на защиту локаатора уже не от высокого напряжения фазных проводов, а от перенапряжений, появляющихся при попадании молнии на грозотрос. И кроме заземления грозотроса в конце линии будет необходимо установка в точках подвеса грозотроса разрядников, основной функцией которых будет являться рассеивание энергии перенапряжений, вызванных прямыми ударами молнии в грозотрос.

Заключение (Conclusions)

Модельные исследования показывают, что при локационном мониторинге воздушных ЛЭП методы ввода зондирующих импульсов в провода с использованием грозотроса и высокочастотной обработки имеют примерно одинаковую результативность.

Таким образом, при отсутствии стандартной ВЧ обработки на ЛЭП имеется реальная возможность их зондирования с использованием грозотроса. Это значительно увеличивает количество ЛЭП, на которых можно осуществить локационный мониторинг их состояния. Это дает возможность организации надежного мониторинга существующих воздушных высоковольтных ЛЭП с использованием современных рефлектометров.

Внедрение методики локационного зондирования ЛЭП с использованием грозотроса позволит оснастить подстанции России и подстанции стран ближнего зарубежья надежной диагностической аппаратурой в виде интеллектуальной локационной системы мониторинга воздушных ЛЭП 35–750 кВ, повышающей бесперебойность их функционирования в условиях эффективного энерго-ресурсосбережения в экстремальных ситуациях.

Литература

1. Shilin A.N. et al. Intelligent Reflectometer for Diagnostics of Air Transmission Lines // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. 2019. pp. 313–326.
2. Тимашева Л.В., Ефимов Е.Н., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия единой сети. 2012. № 5. С. 32–41.
3. Ратушняк В.С., Ратушняк В.С., Ильин Е.С. и др. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергетики из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2018. № 1. Доступно по: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>. Ссылка активна на 11.01.2023.
4. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А. и др. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. 445 с.
5. Башкевич В.Я., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А. и др. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография. Саратов: СГТУ. 2013. 244 с.
6. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Смирнов А.Н. Новые технологии и оборудование (методы и устройства) для определения мест повреждения // Сети России. 2016. № 5 (38). С. 108–116.
7. Минуллин Р.Г., Абдуллазянов Э.Ю., Касимов В.А., Яруллин М.Р. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов. // Известия ВУЗ. Проблемы энергетики. 2013. № 7–8. С. 68–78.
8. Минуллин Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи. Монография. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. 440 с.

© Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

9. Минуллин Р.Г., Ахметова И.Г., Касимов В.А. и др. Локационный мониторинг с определением места повреждения и текущей работоспособности воздушных линий электропередачи. Часть 1. // Электрические станции. 2022. № 11. С. 30–38.

10. Minullin R.G., Akhmetova I.G., Kasimov V.A. et al. Location monitoring with determining the location of damage and the current performance of overhead power lines. // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57, N1. pp. 145–152.

11. Minullin R.G., Akhmetova I.G., Kasimov V.A. et al. Location monitoring of overhead power lines with determining the location of ice deposits and visualization of sounding results. // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57, N1. pp. 153–162.

12. Bi T., Wang S., Jia K. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse // IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. Vol. 12. N2. pp. 272–278.

13. Budi Rahayu Widodo M. et al. Fault Location Detection Using Impedance and Impulse Injection on 20 kV Distribution System Wonokromo Base on Geographic Information System // 2021 The 4th International Conference on Software Engineering and Information Management. 2021. pp. 184–192.

14. de Oliveira L. G. et al. Fault detection and location in power distribution systems: The usefulness of the HS-OFDM scheme for time-domain reflectometry // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 203. pp. 107600.

15. Рефлектометр компьютерный РЕЙС-405: техническое описание // СТЭЛЛ. Доступно по: <https://www.eurostell.com/products/reis-405/>. Ссылка активна на 11.01.2023.

16. Minullin R.G. Electromagnetic Compatibility Between Power-Line Location Monitoring Equipment and High-Frequency Power-Line Communication Equipment // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. N2. pp. 217–226. DOI: 10.1007/s10749-019-01063-3.

17. Minullin R.G. The Effect of Interference in Location Monitoring of Overhead Power Transmission Lines // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. N3. pp. 366–375. DOI: 10.1007/s10749-019-01086-w.

18. Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш. и др. Особенности подключения локационной аппаратуры к линиям электропередачи для определения места повреждения. // Известия ВУЗ. Проблемы энергетики. 2008. № 7–8. С. 60–69.

19. Дмитриев М.В., Родчихин С.В. Грозозащитные тросы ВЛ 35 – 750 кВ. Выбор мест заземления. // Новости электротехники. 2017. №2 (104). С. 2–5.

20. Troppauer W., Lovrenčić V., Gubeljak N. et al. Advanced monitoring of icing and prevention against icing on overhead power lines // Proceedings 18th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS-2019, Iceland, Reykjavik). 2019. Abstr. 6. pp. 1–9.

Авторы публикации

Минуллин Ренат Гизатулович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Локационная диагностика состояния линий электропередачи» (ЛДС ЛЭП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: minullin@mail.ru.

Гранская Анна Андреевна – ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: annamiss35@gmail.com.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук., ректор Казанского государственного энергетического университета.

Ахметова Ирина Гареевна, – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: irina_akhmetova@mail.ru.

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ramil.mustafin@gmail.com.

Касимов Василь Амирович – д-р техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: vasilkasimov@yandex.ru.

References

1. Shilin AN et al. Intelligent Reflectometer for Diagnostics of Air Transmission Lines // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. 2019. P. 313–326.

2. Timasheva LV, Yefimov YeN, Yasinskaya NV. Prichiny i kharakter povrezhdayemosti komponentov vozdukhnykh liniy elektropredachi napryazheniyem 110–750 kV v 1997–2007 gg. // Energiya yedinoi seti. 2012; 5: 32–41. (In Russ).

3. Ratushnyak VS, Ratushnyak VS, Il'in YeS et al. Statisticheskiy analiz avariynykh otklyucheniye elektroenergii iz-za golodedobrazovaniya na provodakh LEP na territorii RF // Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. 2018; 1 Available at: <http://mnv.irknps.ru/toma/11-2018>. Accessed: 11 Jan 2024. (In Russ).
4. Levchenko II, Zasyapkin AS, Alliluyev AA et al. Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdukhnykh liniy elektroperedachi v golodednykh rayonakh: Moskva: MEI; 2007. (In Russ).
5. Bashkevich VYa, Ugarov GG, Kuznetsov PA et al. Monitoring vozdukhnykh liniy elektroperedachi, ekspluatiruyemykh v ekstremal'nykh meteousloviyakh: monografiya. Saratov: SGTU; 2013. (In Russ).
6. Lachugin VF, Platonov PS, Smirnov AN. Novyye tekhnologii i oborudovaniye (metody i ustroystva) dlya opredeleniya mest povrezhdeniya // Seti Rossii. 2016; 5(38): 108–116. (In Russ).
7. Minullin RG, Abdullazyanov EYu, Kasimov VA, Yarullin MR Sovremennyye metody obnaruzheniya golodeda na provodakh vozdukhnykh liniy elektroperedachi. Chast' 1. Metody prognozirovaniya i vzveshivaniya provodov. //Izvestiya VUZ. Problemy energetiki. 2013; 7–8: 68–78. (In Russ).
8. Minullin RG. Lokatsionnyy monitoring golodeda i povrezhdeniy na liniyakh elektroperedachi. Monografiya. Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2022. (In Russ).
9. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Lokatsionnyy monitoring s opredeleniyem mesta povrezhdeniya i tekushchey rabotosposobnosti vozdukhnykh liniy elektroperedachi. Chast' 1. // Elektricheskiye stantsii. 2022; 11: 30–38. (In Russ).
10. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Location monitoring with determining the location of damage and the current performance of overhead power lines. //Power Technology and Engineering. 2023; 57(1): 145–152.
11. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Location monitoring of overhead power lines with determining the location of ice deposits and visualization of sounding results. // Power Technology and Engineering. 2023; 57(1): 153–162.
12. Bi T, Wang S, Jia K. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse //IET Generation, Transmission & Distribution. 2018; 12(2): 272–278.
13. Budi Rahayu Widodo M et al. Fault Location Detection Using Impedance and Impulse Injection on 20 kV Distribution System Wonokromo Base on Geographic Information System // 2021 The 4th International Conference on Software Engineering and Information Management. 2021; 184–192.
14. de Oliveira LG et al. Fault detection and location in power distribution systems: The usefulness of the HS-OFDM scheme for time-domain reflectometry // Electric Power Systems Research. 2022; 203: 107600.
15. Reflektometr kompyuternyy REYS-405: tekhnicheskoye opisaniye // STELL. Available at: <https://www.eurostell.com/products/reis-405/>. Accessed: 11 Jan 2024. (In Russ).
16. Minullin RG. Electromagnetic Compatibility Between Power-Line Location Monitoring Equipment and High-Frequency Power-Line Communication Equipment // Power Technology and Engineering. 2019; 53(2): 217–226. DOI: 10.1007/s10749-019-01063-3.
17. Minullin RG. The Effect of Interference in Location Monitoring of Overhead Power Transmission Lines // Power Technology and Engineering, 2019; 53(3): 366–375. DOI: 10.1007/s10749-019-01086-w.
18. Minullin RG, Petrushenko YuYa, Fardiyevev ISh et al. Osobennosti podklyucheniya lokatsionnoy apparatury k liniyam elektroperedachi dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya. //Izvestiya VUZ. Problemy energetiki. 2008; 7–8: 60–69. (In Russ).
19. Dmitriev M.V., Rodchikhin S.V. Grozozashchitnye trosy VL 35-750 kV. Vybor mest zazemleniya // Novosti ehlektrotekhniki. 2017. No. 2 (104). pp. 2–5. (In Russ).
20. Troppauer W, Lovrenčić V, Gubeljak N et al. Advanced monitoring of icing and prevention against icing on overhead power lines // Proceedings 18th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS-2019, Iceland, Reykjavik). 2019: 1–9.

Authors of the publication

Renat G. Minullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email: minullin@mail.ru.

Anna A. Granskaya – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email: annamiss35@gmail.com.

Edvard YU. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email: irina_akhmetova@mail.ru.

Ramil G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email: ramil.mustafin@gmail.com.

Vasil A. Kasimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email: vasilkasimov@yandex.ru.

© Миңуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г.,
Касимов В.А.

Шифр научной специальности: 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды»

Получено 20.02.2024 г.

Отредактировано 14.03.2024 г.

Принято 06.05.2024 г.