

Авторы:
к.т.н. Подшивалин А.Н.^{1,2},
Исмуков Г.Н.¹,
¹ООО «Релематика»,
²ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия.

**Ph.D. Podshivalin A.N.^{1,2},
Ismukov G.N.¹,
¹Relematika, LLC,
²Chuvash State University,
Cheboksary, Russia.**

Abstract: the application of time-domain reflectometry (TDR) to overhead transmission line in icing conditions is considered. The extra-attenuation effect

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СРЕДСТВАМИ АКТИВНОГО ВОЛНОВОГО ОМП

TRANSMISSION LINE DIAGNOSTICS USING TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY

Аннотация: рассмотрена задача выявления гололедно-изморозевых отложений (ГИО) методом активного зондирования линии электропередачи. Использован эффект увеличения затухания высокочастотного сигнала в проводах под действием ГИО. Этот эффект носит распределенный по длине характер, что позволяет отличить ГИО от локального повреждения линии. Методика оценки ГИО применена к данным, полученным при опытной эксплуатации устройства активного волнового определения места повреждения на воздушной линии 35 кВ. В известных условиях ГИО оценено затухание для разных участков линии, выявлена неравномерная интенсивность ГИО по расстоянию. Периодическое зондирование линии позволило оценить сезонную скорость нарастания ГИО, полученные данные можно использовать для принятия превентивных мер по очистке линии.

Ключевые слова: активное волновое ОМП, гололедно-изморозевые отложения, затухание, высоко-частотный канал связи, активное зондирование, определение места повреждения, диагностика, мониторинг.

of high-frequency signal at iced wires is observed. This effect is distributed along line length, so it is possible to differentiate icing from a local line fault. The ice-detection method is applied to the real data obtained by the pilot operation of TDR fault locator at 35 kV overhead line. Under the known iced conditions, the attenuation was estimated for several line sections and irregular ice intensity over distance was revealed. The periodic line diagnostics allows to estimate the seasonal ice grow rate; the obtained data can be taken into account for line clean up decision.

Введение

Метод активного волнового определения места повреждения (ОМП) основан на анализе реакции линии электропередачи (ЛЭП) на приложенный к одному из ее концов короткий зондирующий импульс [1, 2]. Совокупность возвратившихся из линии отражений обрабатывают согласованным с зондирующим сигналом фильтром и представляют в виде рефлектограммы [3]. Рефлектограмма, отображающая интенсивность отражения от элементов ЛЭП, может использоваться для определения неоднородности параметров ЛЭП по длине и идентификации структуры электрической сети [4]. Изменения оцениваемых параметров во времени свидетельствует об изменениях в ЛЭП, требующих внимания при эксплуатации.

Изменения выявляют сравнением рефлектограмм, измеренных в разных состояниях линии: в предполагаемом нормальном и в оцениваемом режимах [1]. Этот метод успешно применен для оценки расстояния до короткого замыкания линий среднего

напряжения [5]. В статье исследован продолжительный опыт зондирования ЛЭП с изолированной нейтралью. Собрана и представлена статистика отражений, полученных в условиях однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), а также в осенне-зимний период, когда на линии были зарегистрированы опасные ГИО. Реальная величина отложений фиксировалась службой линий при очистке в 2022-2023 гг. Фотография одного из случаев на рис. 1 предоставлена эксплуатирующей организацией.



Рис. 1. ГИО на фазных проводах наблюдаемой линии

Схема и портрет ЛЭП

Опытный образец устройства активно-волнового ОМП на платформе TOP 300 установлен для наблюдения воздушной ЛЭП (ВЛ) напряжением 35 кВ протяженностью 39,22 км. Подключение устройства выполнено с применением специально смонтированного высокочастотного присоединения к одной из фаз линии. Наблюдаемая ВЛ выполнена однотипными опорами ПС110-11 с применением угловых опор в местах изменения направления трассы и переходов через препятствия. На расстоянии 19,8 км от подстанции расположен отпаечный трансформатор, имеющий высокий коэффициент отражения зондирующего сигнала [6]. За время опытной эксплуатации устройства накоплена база рефлектограмм ВЛ в различных условиях и режимах. Одна из них, полученная в типичном нормальном режиме, показана на рис. 2 кривой 1. В отличие от группы пассивных волновых методов [7, 8, 9], метод активного волнового ОМП оперирует искусственно сформированными зондирующими импульсами. Распространяясь по однородной ВЛ, импульсы отражаются и преломляются в точках изменения волнового сопротивления электрической сети. Устройство регистрирует задержку по времени и амплитуду отражения и соотносит ее с расстоянием до точки отражения. На рис. 2 наиболее различимы отражения от сосредоточенных неоднородностей ВЛ: повороты трассы, транспозиция проводов, отпайка. Их местоположение уточнено с использованием картографических данных и паспорта линии.

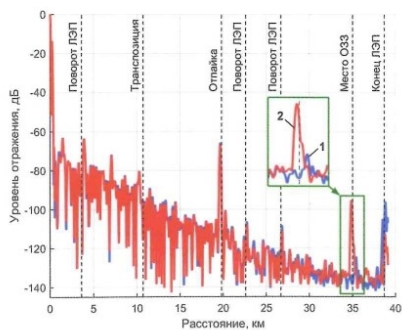


Рис. 2. Рефлектограммы неповрежденной (кривая 1) и поврежденной (кривая 2) ЛЭП

Наблюдение поврежденной ЛЭП

Опытное устройство предназначено для выявления факта повреждения и определения его местоположения. Выявление отклонения портрета от ранее записанного образа производится по наиболее раннему (с наименьшим расстоянием x) превышению заданного порога функцией $D(x)$:

$$D(x) = R(x) - R_0(x),$$

где $R(x)$ и $R_0(x)$ – функции амплитудных рефлектограмм в сравниваемых режимах.

При ОЗЗ измерена рефлектограмма, показанная на рис. 2 кривой 2. Как видно, отличие значений в точке 35,0 км составило более 20 дБ, что указывает на повреждение линии в этом месте. Дополнительная ветвь, появляющаяся в схеме линии при ОЗЗ, – структурное изменение ЛЭП, которое дает значительное отражение, соизмеримое с отражением от конца наблюдаемого объекта.

При ОЗЗ в различных точках x линии наблюдались значимые величины $D(x)$ от 15 до 25 дБ, а погрешность ОМП не превышала 0,3 км. При $x > x_0$ функция $D(x)$ демонстрирует ожидаемое рассогласование рефлектограмм вследствие отличия структуры ЛЭП и, соответственно, появления дополнительной точки отражения и преломления электромагнитной волны. Отличие портрета наблюдается как в режиме под напряжением, так и со снятием рабочего напряжения с линии.

Таким образом, структурные изменения ЛЭП отражаются на рефлектограмме в виде локального повышения уровня отражения, а устройство успешно выявляет факт их возникновения и местоположение путем сравнения рефлектограмм поврежденной и неповрежденной сети.

Наблюдение гололедных образований

Дополнительная функция опытного устройства состоит в диагностике и оценке интенсивности ГИО на ВЛ. Влияние ГИО проявляется главным образом в повышении затухания [11] и увеличении электрической длины ЛЭП за счет удлинения проводов под дополнительной механической нагрузкой [12, 13]. Указанные эффекты приводят к уменьшению амплитуды и увеличению времени возврата отраженного от неоднородностей ЛЭП сигнала в устройство активного волнового ОМП.

Оценка удлинения ВЛ при ГИО выполнена в [12]. Удлинение проводов в полете

Keywords: time-domain reflectometry, traveling-wave fault location, conductor icing, attenuation, high-frequency communication location channel, fault location, diagnostics, monitoring.



Подшивалин

Андрей Николаевич

В 2004 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. В 2005 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Метод информационного анализа и его приложение к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи». Заведующий отделом ООО «Релематика». Доцент кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова.



Исмуков

Григорий Николаевич

В 2012 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. Инженер-исследователь 1 категории ООО «Релематика».

может достигать 0,3% [14]. Этот эффект целесообразно учитывать, например, при оценке удаленности повреждений в задаче ОМП на фоне ГИО.

В процессе опытной эксплуатации устройства наблюдались несколько периодов образования значительных ГИО на проводах ВЛ, что позволило оценить их эффекты на рефлектограммах. Вносимое ГИО затухание α зависит от ряда факторов [11], в том числе от частоты передаваемого сигнала. В рассматриваемом устройстве используются импульсы широкого спектра, а амплитуда рефлектограммы определяется совокупной характеристикой по всему спектру. На основе данных эксплуатации о температуре окружающего воздуха, толщине стенки ГИО $d_{\text{ГИО}} = 20$ мм в предположении цилиндрической формы проводника выделена зависимость величин затухания от частоты сигналов, пример одной из них приведен на рис. 3 в соответствии с [11]:

$$\alpha = K(f, Z, T) \lg(1 + \frac{d_{\text{ГИО}}}{r_{\text{п}}}), \quad (1)$$

где $K(f, Z, T)$ – функция частоты сигнала f , волнового сопротивления линии Z и температуры льда T , значения которой заданы на основе экспериментальных и аналитических исследований [11];

$r_{\text{п}}$ – радиус провода, мм.

В полосе частот наибольшей энергии зондирующего импульса устройства ОМП от f_1 (несколько сотен кГц) до f_2 (несколько мегагерц) получены усредненные значения $\alpha_{\text{расч ср}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{расч ср}} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \alpha(f) df.$$

Уточненные значения $\alpha_{\text{расч}}$ получены с использованием огибающей спектральной плотности $A(f)$:

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} A(f) \alpha(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} A(f) df}.$$

В табл. 1 приведены исходные данные и расчетные затухания для условий двух случаев из эксплуатации.

На рис. 4 показаны рефлектограммы линии до и после образования ГИО на проводах. Видимость ВЛ ограничена затуханием в линии: уже на расстоянии 15 км величина отражений от основных конструкций ЛЭП опускается до уровня шумов. Однако интенсивные отражения от места отпайки позволяют расширить зону наблюдения до 19,7 км.

Таблица 1. Расчетные затухания, вносимые ГИО

№ измерения	$d_{\text{ГИО}}$, мм	T , °С	$\alpha_{\text{расч}}$, дБ/км
1	70	-6,5	2,01
2	20	-7,0	1,11

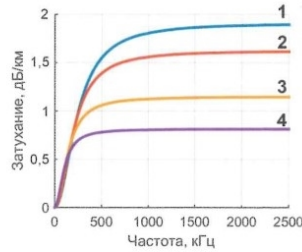


Рис. 3. Теоретическое затухание, вносимое ГИО, в зависимости от частоты сигнала при температуре 0 °С (кривая 1), -3 °С (кривая 2), -6 °С (кривая 3), -10 °С (кривая 4)

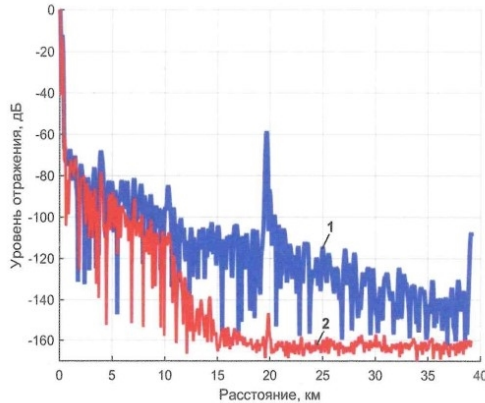


Рис. 4. Рефлектограммы линии до (кривая 1) и после (кривая 2) образования ГИО на проводах

Поскольку величина затухания зондирующего сигнала в неповрежденной ВЛ в общем случае неизвестна, то для оценки дополнительного затухания при ГИО предложено использование приращения отклонения текущей рефлектограммы от рефлектограммы без ГИО, то есть разности значений дефектограммы на концах рассматриваемого участка длины x_n :

$$\alpha_{\text{изм}} = \frac{D(x + x_n) - D(x)}{2x_n}. \quad (2)$$

Величина (2) дает усредненную удельную оценку с учетом двойного затухания при прямом и обратном распространении сигнала по участку ВЛ. Для определения достоверности оценки (2) выполнено дробление наблюдаемого участка на n частей меньшей длины, где длина каждого участка:

$$x_k - x_{k-1} = \frac{x_n}{n}, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Тогда оценка дополнительного затухания каждого участка оценивается как

$$\alpha_{\text{изм}} = \frac{D(x_k) - D(x_{k-1})}{2(x_k - x_{k-1})}.$$

В табл. 2 показаны оценки $\alpha_{\text{изм}k}$ для различной степени дробления наблюдаемого участка для рефлектограммы по рис. 4. Видно, что при $n \leq 8$ оценка неоднородна и требует дополнительного уточнения. Это отчасти может объясняться вариацией толщины стенки ГИО вдоль ВЛ: такой факт отмечен службой линии, проводившей очистку проводов. Для практических целей имеет значение оценка гололеда на протяженных участках линии, а потому выполнена оптимизация числа и границ участков для достижения приемлемого качества оценки затухания. В данном случае оказалось удобным принять в качестве границ участков характерные точки линии в соответствии с табл. 3.

Таблица 2. Оценка $\alpha_{\text{изм}k}$

n	$\alpha_{\text{изм}1}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}2}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}3}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}4}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}5}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}6}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}7}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}8}$, дБ/км
1	2,22	-	-	-	-	-	-	-
2	0,73	3,71	-	-	-	-	-	-
3	1,25	1,32	4,09	-	-	-	-	-
4	0,53	0,93	3,12	4,31	-	-	-	-
5	1,28	0,58	1,20	2,48	5,56	-	-	-
6	1,51	0,99	-0,32	2,96	2,45	5,73	-	-
7	0,45	1,14	0,55	2,38	1,79	2,76	6,47	-
8	-0,20	1,26	0,44	1,41	3,26	2,98	0,09	8,52

Таблица 3. Опорные точки участков гололеда

Номер точки k	Расстояние от начала ВЛ x_k , км	Описание
0	0	Место измерения
1	3,9	Поворот ЛЭП
2	10,3	Транспозиция
3	19,7	Отпайка

По полученным в эксплуатации данным выполнена оценка $\alpha_{\text{изм}}$ на длительном интервале времени. Соответствующие величины представлены на рис. 5 с дискретностью 6 часов. Прослеживаются 3 периода гололеда, завершившиеся на 4, 10 и 17 сутки наблюдения. Затухание вдоль линии неоднородно во все периоды. Измеренные затухания на рис. 5 имеют тот же порядок, что и теоретические затухания табл. 1.

Оценки и представлен в табл. 4 разброс оценок удельных затуханий $\Delta\alpha_{\text{изм}}$ на участках ЛЭП. Оценки получены в условиях относительной стабильности параметров ВЛ в летний и весенний периоды без ГИО с длительностью наблюдения не менее 6 дней. Видно, что разброс не превысил 0,36 дБ/км.

Таблица 4. Оценка уровня отражения от неоднородностей ВЛ

$\Delta\alpha_{\text{изм}1}$, дБ/км	$\Delta\alpha_{\text{изм}2}$, дБ/км	$\Delta\alpha_{\text{изм}3}$, дБ/км
0,23	0,36	0,26

Измеренный разброс оценок можно отнести к инструментальной погрешности оценки дополнительного затухания, вносимого ГИО на проводах ВЛ. Эти данные изображены пунктирной линией на рис. 5. Отметим, что выявленное затухание в условиях ГИОкратно превышает эти пороги.

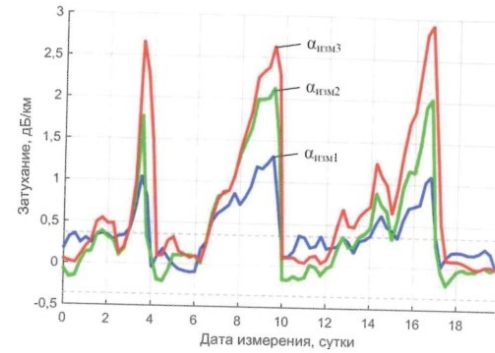


Рис. 5. Удельное затухание по участкам ВЛ

Накопленные устройством данные дают возможность оценить скорость нарастания ГИО. В табл. 5 представлена вероятная скорость β изменения удельного затухания по участкам линии 1, 2 и 3, а также эквивалентная скорость γ роста стенки ГИО на проводах для этих же участков.

Таблица 5. Оценка скорости изменения затухания по участкам линии

Дата	$\beta_{\text{ср}}$, дБ/км/час	$\gamma_{\text{ср}}$, мм/час	$\beta_{\text{ср}}$, дБ/км/час	$\gamma_{\text{ср}}$, мм/час	$\beta_{\text{ср}}$, дБ/км/час	$\gamma_{\text{ср}}$, мм/час
5	0,062	0,52	1,07	0,165	1,77	
10	0,016	0,23	0,016	0,25	0,021	0,23
19	0,012	0,24	0,050	0,48	0,040	0,51

Видно, что в период гололеда целесообразно производить измерения с периодом порядка одного часа, а при превышении определенного порога затухания незамедлительно выполнять очистку проводов от ГИО [10].

Оценка толщины стенки ГИО $d_{\text{ГИОуст}}$ возможна на основе (1) при известной функции $K(f, Z, T)$. Зависимость функции K от частоты f и волнового сопротивления линии Z носит дробно-рациональный характер. Более сложная температурная зависимость определяется критической частотой, соответствующей максимуму тангенса угла диэлектрических потерь в слое льда. В [11] эта зависимость задана в табличном виде для ограниченного набора температур. Для получения непрерывных характеристик выполнена аппроксимация температурной зависимости полиномом второй степени, получена оценка $\hat{K}(f, Z, T)$. Относительная погрешность оценки для пяти табличных значений температуры в диапазоне от -20 °С до 0 °С не превышает 3,7%, что указывает на успешность аппроксимации. Результирующая оценка толщины стенки ГИО для произвольной температуры выполняется на основе уравнения:

$$d_{\text{ГИОуст}} = r_{\text{п}} (10^{\alpha_{\text{изм}}} / \hat{K}(f, Z, T) - 1).$$

Кривые на рис. 6 показывают возможный диапазон толщины стенки гололеда при заданном удельном затухании. Расчетная величина $d_{\text{ГИОуст}}$ представлена из предположения температуры -6 °С. Если известна иная

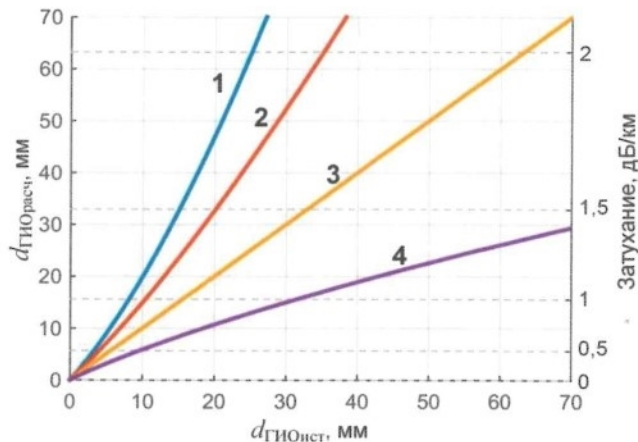


Рис. 6. Оценка толщины стенки ГИО при температуре 0 °С (кривая 1), -3 °С (кривая 2), -6 °С (кривая 3), -10 °С (кривая 4)

температура, то истинная величина стенки гололеда $d_{\text{ГИО ист}}$ может быть рассчитана по соответствующему графику с высокой точностью.

Выводы

Метод активного зондирования позволяет отслеживать не только повреждения ЛЭП, но и образование ГИО. Разный характер этих явлений позволяет устройству ОМП в первом случае определять точную координату повреждения, а во втором – оценивать толщину стенки ГИО на отдельных участках ЛЭП. Анализ данных, зарегистрированных при активном зондировании, делает возможным контроль ГИО по всей протяженности линии, без пропусков, характерных для датчиков на физическом принципе (например, тензометрическом). Непрерывный дистанционный мониторинг линии позволяет оценивать и прогнозировать гололедную на-

грузку на ЛЭП для принятия превентивных мер по ее очистке.

Литература:

- Куликов А.Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с.
- Догадкин Д., Марин Р., Ширшова Е., Исмуков Г., Куликов А., Линт М., Подшивалин А. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 5. – С. 98-103.
- P. Smith, C. Furse, J. Gunther. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location // IEEE Sensors Journal. 2005. Vol. 5. pp. 1469-1478.
- V. Taylor, M. Faulkner. Line monitoring and fault location using spread spectrum on power line carrier // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 1996. Vol. 143. pp. 427-434.
- Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждения ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 164 с.
- Закамский Е.В. Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6 - 35 кВ: дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Казань, 2004. – 168 с.
- Лачугин В.Ф., Ятимов И.М. Релейная защита линий электропередачи с использованием контроля распространения электромагнитных волн // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 4 (53). – С. 46-51.
- Лачугин В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1 (50). – С. 58-61.
- Федоров А.О., Петров В.С., Ильин А.А. Одностороннее волновое определение места повреждения на основе сверточной нейронной сети // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 3 (52). – С. 48-53.
- Бульчев А.В., Александров А.С. Управление удалением гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 3 (48). – С. 24-31.
- Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 271 с.
- Минуллин Р.Г., Губаев Д.Ф. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 207 с.
- Касимов В.А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: дис. ... д-ра технических наук: 05.11.13 / КГЭУ. – Казань, 2019. – 395 с.
- Губаев Д.Ф. Обнаружение гололеда на линиях электропередачи локационным методом: дис. ... к-та технических наук: 05.11.13 / КГЭУ. – Казань, 2009. – 186 с.