

Авторы:

Федоров А.О.<sup>1,2</sup>,  
к.т.н. Петров В.С.<sup>1,2</sup>,  
Разумов Р.В.<sup>3</sup>,  
Петров А.А.<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>ЧГУ им. И.Н. Ульянова,

<sup>2</sup>ООО «ЭКРА ИТ»,

<sup>3</sup>ООО НПП «ЭКРА»,

г. Чебоксары, Россия.

Fedorov A.O.<sup>1,2</sup>,  
Ph.D. Petrov V.S.<sup>1,2</sup>,  
Razumov R.V.<sup>3</sup>,  
Petrov A.A.<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Chuvash State University,

<sup>2</sup>«ЭКРА ИТ» Ltd.,

<sup>3</sup>«ЭКРА» RPE Ltd.,

Cheboksary, Russia.

**Abstract:** despite the simplicity of the double-end

# ВОЛНОВОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

## TRAVELING WAVE FAULT LOCATION ON POWER LINE

Аннотация: несмотря на простоту идеи, положенной в основу двухстороннего и одностороннего волнового определения места повреждения (ОМП) линии электропередачи (ЛЭП), многие теоретические и практические задачи, связанные с обеспечением функционирования устройства волнового ОМП во всем многообразии схем электроэнергетической сети, все ещё находятся в процессе решения. В статье предлагаются способы функционирования волнового ОМП на ЛЭП с короткой обходной связью и кабельными вставками, способы распознавания волны, отраженной от места повреждения, и волны, отраженной от противоположного конца ЛЭП, способы определения фактической скорости распространения волны в линии по волнам от повреждения, обеспечивающие в совокупности повышение точности ОМП.

Ключевые слова: определение места повреждения, двухсторонний и односторонний волновые способы, короткое замыкание.

and single-end traveling wave fault location principles on power line, many theoretical and practical problems associated with ensuring the functioning of the locator in the entire variety of power network schemes are still not solved. The article proposes methods for the traveling wave locator operation on power lines with a short parallel line and cable segments, methods for recognizing the wave reflected from the fault and wave reflected from the opposite end of the line, and methods for determining the actual velocity of wave propagation in the line, which provide an increase in the accuracy of fault location.

**Keywords:** fault location, double-end and single-end traveling wave method, power line.

### Введение

На точность волнового ОМП практически не влияет насыщение трансформаторов тока, изменение параметров энергосистемы противоположного конца ЛЭП и изменчивый характер промежуточных отборов мощности. Однако сама реализация принципа волнового ОМП требует решения ряда задач, связанных с распознаванием волн от места повреждения на ЛЭП различной конфигурации и оценкой скорости их распространения по линии. В статье предлагаются решения этих и других задач, так или иначе связанных с реализацией волнового ОМП ЛЭП.

Принцип двухстороннего волнового ОМП базируется на распознавании первичных волн, возникших в месте повреждения и пришедших к концам контролируемой ЛЭП [1]. Расстояние до места повреждения при этом определяется следующим образом:

$$\hat{x}_f = \frac{LL}{2} - \frac{t_f^R - t_f^L}{2} v, \quad (1)$$

где  $LL$  и  $v$  – длина контролируемой ЛЭП и скорость распространения волны в ней;  $t_f^L$  и  $t_f^R$  – моменты прихода первичных волн к месту установки левого  $FL_L$  и правого  $FL_R$  полуккомплектов устройства ОМП (рис. 1).

Оценка расстояния до места повреждения при одностороннем волновом ОМП может выполняться двумя способами. В одном случае требуется распознать первичную волну, пришедшую от места короткого замыкания (КЗ), и волну, вернувшуюся после отражения от места повреждения [1], [2]. Расстояние до места КЗ при этом определяется как длина пути, пробегаемого волной по ЛЭП за половину отрезка времени между моментами прихода первичной и отраженной от КЗ волн ( $t_f^L$  и  $t_r^L$  на рис. 1):

$$\hat{x}_f = \frac{t_r^L - t_f^L}{2} v. \quad (2)$$

В другом случае место повреждения может быть определено по волне, пришедшей к месту измерения после отражения от

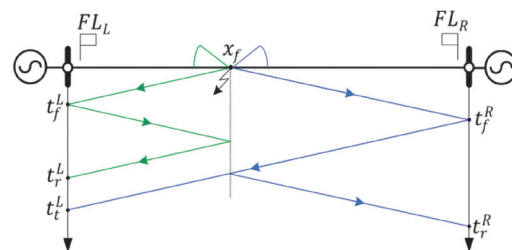


Рис. 1. Характеристика распространения волн от КЗ при повреждении на ЛЭП

противоположного конца линии в момент  $t_r^L$  (рис. 1):

$$\hat{x}_f = LL - \frac{t_i^L - t_f^L}{2} v. \quad (3)$$

На точность фиксации моментов  $t_r^L$  и  $t_i^L$  прихода отраженных волн напрямую влияет амплитуда и крутизна их фронта. Последнее зависит как от расстояния, пройденного волной по линии, так и от параметров повреждения. Так, например, волна при отражении от места однофазного КЗ с большим переходным сопротивлением значительно затухает (рис. 2, [3]) и распознать её по этой причине может быть проблематично. Поэтому в таком случае лучше использовать способ (3). Вместе с этим волна, отраженная от противоположного конца линии, подвергается значительному затуханию при преломлении через двухфазные и трехфазное КЗ с малым переходным сопротивлением. При этом уже предпочтительнее использовать способ (2).

Учитывая сказанное, на практике сначала целесообразно определить отраженную волну с большей амплитудой и только затем применять один из способов (2) или (3).

Несмотря на кажущуюся простоту одностороннего волнового ОМП, его реализация значительно осложнена наличием множества других волн, приходящих к месту измерений от различных неоднородностей электрической сети (рис. 3). В результате распознавание среди них нужных волн становится непростой задачей.

Наряду с этим, как при одностороннем, так и при двухстороннем волновом ОМП распознавание первичных волн усложняется при наличии короткой обходной связи. Дело в том, что первичная волна, распространяющаяся в противоположную сторону от места измерений, может прийти к нему по обходной связи раньше, чем первичная волна с контролируемой линии (рис. 4).

Кроме того, для точного определения места повреждения требуется знать фактическую скорость распространения волны по линии. Традиционно, с некоторым допущением, полагают, что волна распространяется вдоль ЛЭП со скоростью, характерной для линии без потерь [4, 5]. Однако в связи с тем, что идеальная модель ЛЭП лишь упрощенно описывает процессы распространения волн по ней, это ведет к увеличению погрешности определения расстояния до места повреждения.

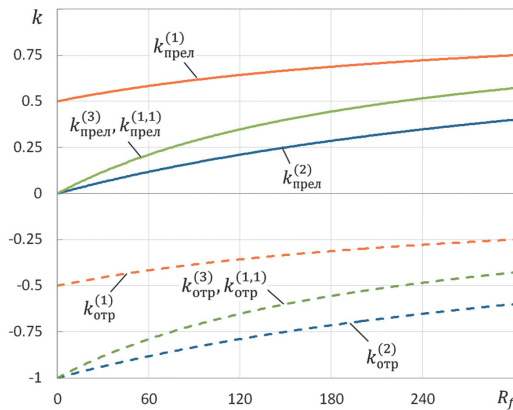


Рис. 2. Коэффициенты отражения и преломления волн воздушного волнового канала в месте повреждения при различных видах КЗ и переходных сопротивлениях  $R_f$ : верхние индексы (1), (2), (1,1) и (3) – однофазное, двухфазное, трехфазное на землю и трехфазное КЗ соответственно

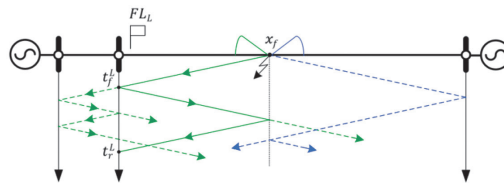


Рис. 3. Характеристика распространения волн по контролируемой ЛЭП и в примыкающей электрической сети

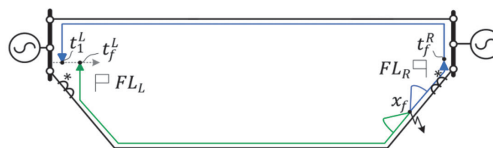


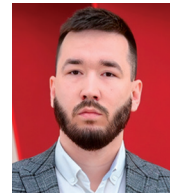
Рис. 4. Процесс распространения волн по контролируемой ЛЭП и короткой обходной связи:  $t_i^L$  – момент прихода к месту установки полуккомплекта  $FL_L$  волны с короткой обходной связи

В последующих разделах изложены способы решения этих задач с целью повышения точности двухстороннего и одностороннего волнового ОМП ЛЭП.

### Распознавание первичной волны на ЛЭП с короткой обходной связью

Как видно из рис. 4, первой к месту установки устройства может прийти волна с короткой обходной связи. Использование её момента прихода  $t_i^L$  при двухстороннем волновом ОМП приведет к неправильному определению расстояния до места повреждения.

Традиционно [6–9] задача распознавания первичной волны, пришедшей с кон-



Федоров

Алексей Олегович

В 2020 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

Аспирант кафедры

ТОЭ и РЗА

ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Инженер-исследователь

2 категории

ООО «ЭКРА ИТ».



Петров

Владимир Сергеевич

В 2010 г. в ЧГУ

им. И.Н. Ульянова полу-

чил степень магистра по

направлению «Электро-

энергетика» по профилю

«Электроэнергетические

системы, сети, электропере-

дачи, их режимы, устойчи-

вость и надежность».

В 2015 г. в ЧГУ

им. И.Н. Ульянова защитил

кандидатскую диссертацию

на тему «Цифровая система

автоматического ограниче-

ния повышения напряже-

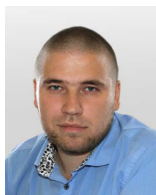
ния сетей 110–750 кВ».

Доцент кафедры ТОЭ и РЗА

ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Руководитель группы

ООО «ЭКРА ИТ».



**Разумов Роман Вадимович**

В 2008 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности инженер. Директор департамента автоматизации энергосистем (ДАЭС) ООО НПП «ЭКРА».



**Петров Алексей Александрович**

В 2011 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

Руководитель направления ПА, РАС и ОМП департамента автоматизации энергосистем (ДАЭС) ООО НПП «ЭКРА».

тролируемой линии, решается путем оценки её мгновенной мощности: если она отрицательна, то волна пришла от места повреждения по контролируемой ЛЭП, а если положительна, то – по короткой обходной связи. Такой способ требует точного измерения первой и последующих волн напряжения. Однако сделать это затруднительно из-за выраженной нелинейности амплитудно-частотных характеристик индуктивных и емкостных трансформаторов напряжения [10–15]. Трансформаторы тока же, напротив, позволяют с высокой точностью измерять волны от КЗ [16, 17]. Поэтому предпочтительным является применение способов распознавания первичной волны с контролируемой линии, основанных лишь на измерении тока.

Для распознавания упомянутой первичной волны необходимо использовать следующие признаки:

1) Полярности первичных волн тока, пришедших к полукомплексам двухстороннего волнового ОМП по контролируемой линии, совпадают (так же, как и в месте повреждения).

При одностороннем волновом ОМП информация с противоположного конца ЛЭП недоступна. Поэтому за полярность первичной волны тока, пришедшей с контролируемой линии, принимается полярность мгновенного предаварийного напряжения в месте повреждения, рассчитанном ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), для соответствующего междуфазного волнового канала [29, 30].

Как при двухстороннем, так и при одностороннем волновом ОМП по этому признаку может быть исключена из рассмотрения волна, пришедшая к полукомплекту  $FL_L$  по короткой обходной связи в момент времени  $t_1^L$  (рис. 4).

2) Относительно момента  $t_1^L$  прихода первичной волны с обходной связи первичная волна с контролируемой ЛЭП должна прийти к месту измерений не позже, чем разница между временами пробега волной контролируемой ЛЭП и короткой обходной связи. Этот признак основан на рассмотрении наихудшего случая, когда КЗ происходит в конце контролируемой линии (рис. 4), и позволяет определить временное окно поиска.

3) Для однородной контролируемой ЛЭП амплитуда первичной волны тока, при-

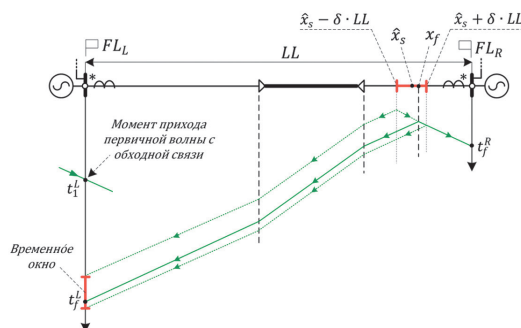


Рис. 5. Принцип распознавания первичной волны, пришедшей к полукомплекту  $FL_L$  с неоднородной контролируемой ЛЭП

ходящей по ней к месту измерений, всегда больше амплитуды первичной волны с обходной связи. Объясняется это тем, что волна, сначала преломляясь в обходную связь, а затем преломляясь из неё в контролируемую линию, значительно затухает.

Если же контролируемая ЛЭП содержит кабельные вставки или ответвления, то первичная волна будет также затухать при преломлении через такие места неоднородности [10]. Следовательно, распознать её по максимальной амплитуде уже не удастся. Поэтому при двухстороннем волновом ОМП на таких ЛЭП предлагается вести поиск упомянутой волны во временном окне, рассчитанном на основе оценки  $\hat{x}_s$  расстояния до места повреждения, определенной ОМП по ПАР [18], и его максимальной относительной погрешности  $\delta$ . Для определения границ временного окна строятся характеристики распространения волн от одного конца ЛЭП к другому (рис. 5).

### Распознавание волны, отраженной от места повреждения, и волны, отраженной от противоположного конца контролируемой ЛЭП

При одностороннем волновом ОМП для распознавания волны, вернувшейся к устройству после отражения от места повреждения, традиционно используется информация о предполагаемом месте КЗ, определенном односторонним методом ОМП по ПАР [22, 23]. Так, опираясь на оценку расстояния до предполагаемого места повреждения  $\hat{x}_s$ , во входном сигнале можно выделить временное окно, в котором ожидается появление волны от места повреждения. Причем центр временного окна определяется как:

$$\hat{t}_r^L = t_f^L + \frac{2\hat{x}_s}{v},$$

а его ширина выбирается с учетом множества факторов, в том числе и погрешности одностороннего ОМП по ПАР [18], а также неточности задания скорости распространения волны по линии. Учет этих факторов приводит к расширению временного окна, повышая вероятность появления в нем нескольких волн. Это обстоятельство требует введения дополнительных критериев, по которым может быть распознана волна, отраженная от места повреждения.

В [23-25] полярность волны, отраженной от места повреждения, принимается равной полярности первичной волны. Такое условие отбора основано на том предположении, что волновое сопротивление электрической сети, примыкающей к контролируемой ЛЭП в месте установки устройства, меньше волнового сопротивления самой контролируемой линии. Однако в некоторых случаях может оказаться так, что волновое сопротивление примыкающей электрической сети будет больше волнового сопротивления контролируемой линии. При этом упомянутый способ потеряет свою работоспособность из-за изъяна в критерии распознавания волны, отраженной от места повреждения.

Для того, чтобы сформулировать правильный критерий распознавания волны, отраженной от места повреждения, рассмотрим особенности ее распространения по линии. Для определенности примем, что полярность первичной волны 1, возникшей в месте КЗ, положительная (рис. 6). Волновые процессы в ЛЭП при этом рассмотрим в схеме междуфазного волнового канала.

Падающая на место установки устройства  $FL_L$  волна 1 в момент  $t_f^L$  порождает преломленную и отраженную волны (рис. 6). Амплитуда и полярность отраженной волны 2 определяются коэффициентом отражения:

$$k_r^L = \frac{z_a^L - z_l}{z_a^L + z_l},$$

который зависит от соотношения волнового сопротивления контролируемой ЛЭП  $z_l$  и волнового сопротивления  $z_a^L$  электрической сети, примыкающей к ней в месте установки устройства.

Если волновое сопротивление  $z_a^L$  электрической сети, примыкающей к ЛЭП в месте установки устройства, меньше волнового сопротивления контролируемой ЛЭП  $z_l$ , то  $k_r^L < 0$  и полярность отраженной волны 2 противоположна полярности падающей волны 1. Этот случай изображен на рис. 6а. Отраженная волна 2 с полярностью, противоположной полярно-

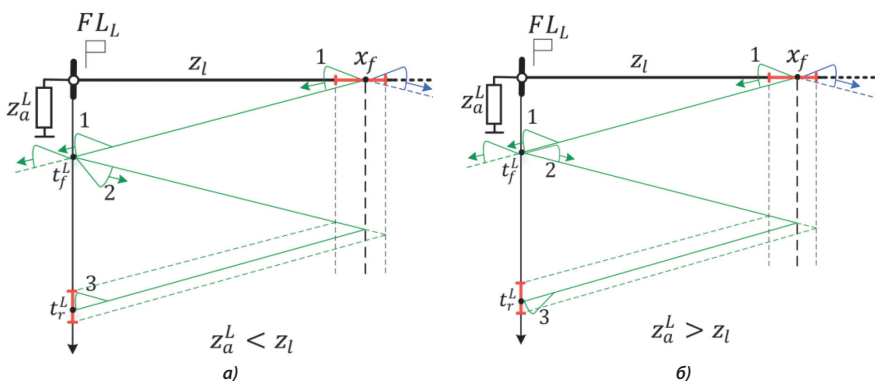


Рис. 6. Полярности волн в месте установки устройства ОМП, когда эквивалентное волновое сопротивление  $z_a^L$  примыкающей электрической сети а) меньше; б) больше волнового сопротивления контролируемой линии  $z_l$

сти падающей волны 1, направляется к месту КЗ  $x_f$ . Достигнув места КЗ, она отражается обратно, изменяя полярность [26]. Во второй раз в месте установки устройства  $FL_L$  она возникнет в виде новой волны 3. Как видно из рис. 6а полярность падающих волн 1 и 3 в этом случае будет одинаковой. Следовательно, при волновом сопротивлении  $z_a^L$  электрической сети, примыкающей к ЛЭП в месте установки устройства, меньшем волнового сопротивления контролируемой ЛЭП  $z_l$ , устройство ОМП должно определять расстояние до места КЗ по (2) в вышеупомянутом временном окне по волне, полярность которой совпадает с полярностью первичной волны [28].

Если же волновое сопротивление  $z_a^L$  электрической сети, примыкающей к контролируемой ЛЭП в месте установки устройства, больше волнового сопротивления самой линии  $z_l$ , то  $k_r^L > 0$  и полярность отраженной волны 2 совпадает с полярностью падающей волны 1. Этот случай иллюстрируется на рис. 6б. При этом отраженная волна 2 вернется к месту установки устройства в виде новой волны 3 с полярностью уже противоположной к полярности падающей волны 1. Следовательно, при волновом сопротивлении  $z_a^L$  электрической сети, примыкающей к контролируемой ЛЭП в месте установки устройства, большем волнового сопротивления контролируемой линии  $z_l$ , устройство должно определять расстояние до места КЗ по (2) в вышеупомянутом временном окне по волне, полярность которой противоположна полярности первичной волны [28].

Аналогичные рассуждения применимы и при распознавании волны, отраженной от противоположного конца контролируемой линии. Если волновое сопротивление  $z_a^R$  электрической сети, примыкающей к противоположному концу ЛЭП, меньше волнового сопротивления  $z_l$  контролируемой линии, то полярность волны, отраженной от противоположного конца ЛЭП, будет противоположна полярности первичной волны

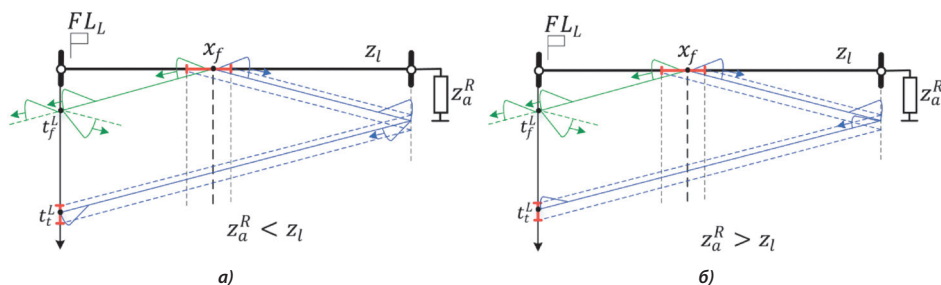


Рис. 7. Полярности волн в месте установки устройства ОМП, когда эквивалентное волновое сопротивление  $Z_a^R$  электрической сети, примыкающей к противоположному концу ЛЭП,

а) меньше; б) больше волнового сопротивления контролируемой линии  $z_l$

(рис. 7а); иначе (рис. 7б) – их полярности будут совпадать. Объясняется это тем, что полярность волны, отраженной от противоположного конца ЛЭП, зависит от знака коэффициента отражения, определяемого по аналогии с  $k_r^L$ .

Таким образом, при одностороннем волновом ОМП необходимо адаптивно (с учетом конфигурации примыкающей электрической сети) менять критерий распознавания волн, отраженных от места КЗ и от противоположного конца контролируемой ЛЭП.

### Определение фактической скорости распространения волны по ЛЭП

Известно, что использование в ОМП скорости распространения волны по линии без потерь ведет к увеличению погрешности оценки расстояния до места КЗ. В связи с чем в устройстве целесообразно применять алгоритмы определения фактической скорости распространения волны по ЛЭП.

Так, например, в [23, 27] фактическая скорость распространения волны по линии определяется как скорость, с которой волна пробегает удвоенную длину ЛЭП при её включении на холостой ход. Реализация такого способа может затянуться до начала планового технического обслуживания и ремонта первичного оборудования, в рамках которых возможны переключения контролируемой линии.

В [31] предлагается определять фактическую скорость распространения волны по линии путем компенсации ошибки оценки расстояния до места КЗ, полученной в результате обхода ЛЭП ремонтной бригадой. Такой способ тем точнее, чем больше опыт эксплуатационной статистики устройства. Поэтому при первых срабатываниях устройства фактическая скорость будет определяться с погрешностью.

Предпочтительнее определять фактическую скорость распространения волны по волнам от КЗ, поскольку при этом не требуется дополнительных технических мероприятий по коммутации ЛЭП, а также нет необходимости накапливать эксплуатационную статистику устройства для достижения приемлемой точности ОМП. Так, упомянутую фактическую скорость мож-

но определить как скорость, с которой волна пробегает удвоенную длину ЛЭП за время, равное сумме отрезков времени между моментами прихода к каждому полукомплекту ОМП первичной волны и волны, отраженной от места КЗ (рис. 1), [19]:

$$v_{act} = \frac{2LL}{t_r^L - t_f^L + t_r^R - t_f^R}$$

При этом для распознавания волны, отраженной от места КЗ, можно использовать расстояние до предполагаемого места повреждения, определенное по (1) на основе скорости распространения волны по линии без потерь.

Если распознать волну, отраженную от места КЗ, хотя бы на одном из концов ЛЭП не удалось, то фактическая скорость распространения волны в линии может быть определена как скорость, с которой волна пробегает всю длину ЛЭП при повреждении (рис. 1), [32]:

$$v_{act} = \frac{LL}{t_r^L - t_f^L}$$

Определить фактическую скорость распространения волны в линии по волнам от КЗ можно и односторонним способом. Для этого необходимо вышеописанными способами распознать волну, отраженную от места КЗ, и волну, отраженную от противоположного конца линии, и зафиксировать их моменты прихода  $t_r^L$  и  $t_i^L$  к устройству. Тогда фактическую скорость можно определить как (рис. 1):

$$v_{act} = \frac{2LL}{t_r^L - t_f^L + t_i^L - t_f^L}$$

Для исключения неправильной работы таких способов целесообразно контролировать, находится ли рассчитанное значение фактической скорости  $v_{act}$  в допустимом диапазоне.

Таким образом, при двухстороннем и одностороннем волновом ОМП возможно определить фактическую скорость распространения волны по линии на основе волн от КЗ при первом срабатывании устройства. В ходе дальнейшей эксплуатации эта скорость будет постоянно уточняться путем усреднения ранее накопленных данных с учетом сезонных изменений длины линии.

### Особенности волнового ОМП ЛЭП с кабельными вставками

Скорость распространения волны в кабеле вследствие его высокой емкости значительно ниже скорости распространения волны в воздушной линии. Это не позволяет напрямую применять выражение (1) для опре-

деления расстояния до места повреждения на кабельно-воздушной линии (КВЛ).

Согласно классическому принципу волнового ОМП на КВЛ сначала локализуется поврежденный участок линии, а затем на основе пересчитанных к его границам моментов прихода первичных волн по (1) определяется расстояние до места повреждения. Общая формула в таком случае принимает вид [20], [21]:

$$\hat{x}_f = LL_{ns} + \frac{LL_{fs}}{2} - \left( \left( t_f^R - \sum_{i=1}^n \frac{LL_i}{v_i} \right) - \left( t_f^L - \sum_{j=1}^m \frac{LL_j}{v_j} \right) \right) \frac{v_{fs}}{2},$$

где  $LL_{ns}$  – сумма длин неповрежденных участков КВЛ со стороны полукомплекта  $FL_L$ ;

$LL_{fs}$  – длина поврежденного участка;

$LL_i$  ( $LL_j$ ) и  $v_i$  ( $v_j$ ) – длина  $i$ -го ( $j$ -го) неповрежденного участка, находящегося между дальней (ближней) границей поврежденного участка и местом установки другого (своего) полукомплекта, и скорость распространения волны в нем,  $n(m)$  – количество неповрежденных участков КВЛ, находящихся между дальней (ближней) границей поврежденного участка и местом установки другого (своего) полукомплекта;

$v_{fs}$  – скорость распространения волны в поврежденном участке.

При этом для определения поврежденного участка КВЛ оценивают длительность интервала  $\Delta$  между упомянутыми моментами  $t_f^L$  и  $t_f^R$  прихода первичных волн к устройствам и расчетные длительности интервалов  $\Delta_p$ ,  $i = \overline{1, n+m+1}$  между ними в предположении, что место повреждения расположено на границах участков. При этом поврежденный участок определяют по месту расположения длительности интервала  $\Delta$  в последовательности расчетных длительностей интервалов  $\Delta_p$ .

При таком способе ОМП для обеспечения высокой точности необходимо знать фактическую скорость распространения волны на каждом участке КВЛ. С этой целью проводится включение КВЛ на холостой ход, и фактическая скорость распространения волны в каждом участке оценивается как скорость, с которой волна пробегает расстояние, равное удвоенной длине участка, за время, равное длительности интервала между моментами прихода волн, отраженных от его границ (рис. 8), [21]:

$$v_g = \frac{2LL_g}{t_g^{LB} - t_{g-1}^{LB}},$$

где  $LL_g$  – длина  $g$ -го участка КВЛ,  $g = \overline{1, k}$ ;

$k$  – количество участков;

$t_g^{LB}$  и  $t_{g-1}^{LB}$  – моменты прихода волн, отраженных от границ  $g$ -го участка.

Такой способ определения скорости распространения волны имеет ранее упомянутый недостаток. Кроме того, волна по мере распространения по КВЛ затухает вследствие преломлений на границах участков. В результате чего зачастую приходится

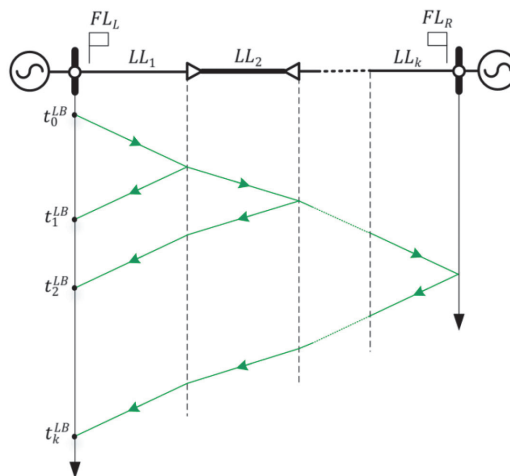


Рис. 8. Характеристика распространения волн при включении КВЛ на холостой ход в момент  $t_0^{LB}$

дважды коммутировать линию – сначала с одной стороны, а затем с другой.

Однако определить поврежденный участок КВЛ и расстояние до места повреждения в нем можно и без использования предварительной информации о скоростях распространения волн на участках.

Так, например, поврежденный участок КВЛ может быть определен исходя из условия равенства амплитуд первичных волн, возникших в месте повреждения ( $A_f$  на рис. 9а). Для этого сначала на основе измеренных фазных токов и известного коэффициента преломления волн в месте установки устройства оценивают амплитуду первичной волны, падающей на место измерений ( $A_{loc}^L$  и  $A_{loc}^R$  на фиг. 9а). После чего в каждом устройстве определяют зависимость амплитуды первичной волны при распространении вдоль участков КВЛ с учетом ее затухания и предположения, что место повреждения находится на противоположном конце линии (фиг. 9б). Для наглядности пояснений рассматриваемого примера примем, что участки КВЛ являются линиями без потерь. При этом на практике учет затухания при распространении волны вдоль КВЛ может быть выполнен по методике [33].

С учетом упомянутого допущения устройство  $FL_L$  принимает, что амплитуда  $A_{i+1}^L$  первичной волны на каждом  $i+1$  участке отличается от амплитуды  $A_i^L$  на  $i$ -м участке на величину, обратную коэффициенту преломления  $k_i^L$  волны из  $i+1$  участка в  $i$ -й, то есть:

$$A_{i+1}^L = \frac{A_i^L}{k_i^L},$$

а  $A_i^L = A_{loc}^L$  и  $k_i^L = \frac{2z_{i+1}}{z_i + z_{i+1}}$ , где  $z_i$  – волновое сопротивление  $i$ -го участка,  $i = \overline{1, 4}$  – количество мест неоднородности на КВЛ.

Вместе с этим устройство  $FL_R$  принимает, что амплитуда  $A_i^R$  первичной волны на каждом  $i$ -м участке от-

личается от амплитуды  $A_{i+1}^R$  на  $i+1$  участке на величину, обратную коэффициенту преломления  $k_i^R$  волны из  $i$ -го участка в  $i+1$ , то есть:

$$A_R^i = \frac{A_{i+1}^R}{k_i^R},$$

причем  $A_5^R = A_{loc}^R$  и  $k_i^R = \frac{2z_i}{z_i + z_{i+1}}$ .

Устройства обмениваются полученными оценками и за поврежденный участок КВЛ принимают участок, который соответствует минимальному значению модулей разности оценок, соответствующих одному участку линии (фиг. 9в). Поэтому для рассматриваемого примера поврежденный участок будет определен как четвертый. Такой способ не использует скорости распространения волны вдоль КВЛ и, как следствие, точнее.

При этом расстояние до места повреждения на КВЛ можно определить как

$$x_f = LL_{ns} + \frac{T_L}{T_L + T_R} LL_{fs},$$

где  $T_L$  и  $T_R$  – времена пробега волной ближней и дальней части поврежденного участка дважды (рис. 9а).

Для оценки времен  $T_L$  и  $T_R$  необходимо распознать на концах КВЛ первые отраженные от места повреждения волны, которые приходят к устройству  $FL_L$  и  $FL_R$  в моменты  $t_s^L$  и  $t_s^R$  соответственно. С этой целью могут быть использованы особенности реализации одностороннего волнового ОМП, изложенные в настоящей статье.

### Выводы

Первой к месту установки устройства волнового ОМП может прийти волна с короткой обходной связи. Использование её момента прихода как при двухстороннем, так и при одностороннем ОМП приведет к неправильному определению расстояния до места повреждения. В статье предложены способы распознавания первичной волны, пришедшей с контролируемой линии, имеющей короткую обходную связь, по ожидаемым полярности, амплитуде и моменту прихода. Данные способы позволяют отказаться от измерения волн напряжения для оценки направления распространения волны на основе анализа её мгновенной мощности и могут применяться как на воздушных, так и на кабельно-воздушных ЛЭП.

При одностороннем волновом ОМП на воздушной ЛЭП предложено адаптивно менять критерий распознавания волны, отраженной от места повреждения, и волны, отраженной от противоположного конца контролируемой линии. Так, если волновое сопротивление электрической сети, примыкающей к ЛЭП в месте установки устройства, меньше волнового сопротивления контролируемой линии, то полярность волны, отраженной от места повреждения, должна совпадать с полярностью первичной волны, иначе – они должны быть противоположны. Вместе с этим, если волновое сопротивление электрической сети, примыкающей к противоположному концу ЛЭП, меньше волнового сопротивления контролируемой линии, то полярность волны, отраженной от противоположного конца линии, должна быть противоположна полярности первичной волны, иначе – они будут совпадать. Такая адаптивная работа одностороннего волнового ОМП позволяет повысить точность оценки расстояния до места повреждения на ЛЭП для всего многообразия конфигураций примыкающей электрической сети.

Также при двухстороннем и одностороннем волновом ОМП на воздушных ЛЭП предлагается определять фактическую скорость распространения волн от КЗ, поскольку при этом не требуется дополнительных технических мероприятий по коммутации линии, а так-

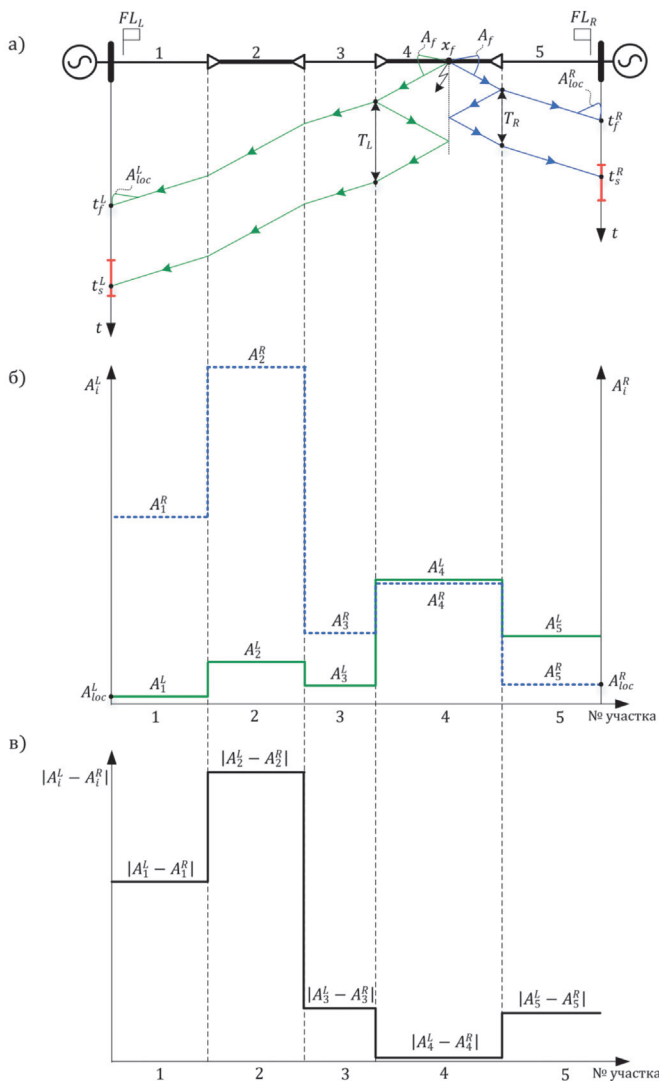


Рис. 9. а) характеристика распространения волн при КЗ на КВЛ; б) оценки амплитуд первичных волн на участках КВЛ; в) модуль их разности

же нет необходимости накапливать эксплуатационную статистику устройства для оценки фактической скорости распространения волн.

Способы волнового ОМП, представленные в настоящей статье, реализованы в устройстве ЭКРА 233 09ХХ. Его испытания в схемах различной конфигурации подтвердили высокую точность предлагаемых решений.

#### Литература:

1. Лачугин, В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / В.Ф. Лачугин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1 (50). – С. 58-61.
2. Козлов, В.Н. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждения за счет отраженных волн / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, Ю.В. Бычков // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4 (37). – С. 34-37.
3. Фёдоров, А.О. Одностороннее волновое определение места повреждения на основе сверточной нейронной сети / А.О. Фёдоров, В.С. Петров, А.А. Ильин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 3 (52). – С. 48-53.
4. N. Fischer, V. Skendzic, R. Moxley and J. Needs, «Protective relay traveling wave fault location», 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), Birmingham, UK, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1049/cp.2012.0093.
5. K.H. Le, P.H. Vu, «Performance Evaluation of Traveling Wave Fault Locator for a 220 kV Hoa Khan-Thanh My Transmission Line», Engineering, Technology & Applied Science Research, Engineering, Technology & Applied Science Research, pp. 3243-3248.
6. A. Guzman, M. Mynam, V. Skendzic and L. Eternod, «Directional Elements – How Fast Can They Be», XIV Simposio Iberoamericano Sobre Proteccion de Sistemas Electricos de Potencia Monterrey, Mexico February 18–22, 2019.
7. A.T. Johns and S.K. Salman, «Digital protection for power systems», Peter Peregrinus Ltd, London, UK, 1995, 218 p.
8. X. Dong, S. Luo, S. Shi, B. Wang and S. Wang, «Realization and performance analysis of travelling wave based directional protection prototype», 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, China, 2015, pp. 1236-1239, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432424.
9. E.O. Schweitzer, B. Kasztenny and M.V. Mynam, «Performance of time-domain line protection elements on real-world faults», 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2016, pp. 1-17, DOI: 10.1109/CPRE.2016.7914904.
10. A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina, «Limitations of Traveling Wave Fault Location», 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.
11. Попов, И.Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с. – Текст: непосредственный.
12. A.M. Elhaffar, «Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves», doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, March 2008.
13. S. Marx and B. Johnson, «Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results», 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, Georgia, May 6–7, 2013.
14. Xinzhou Dong, Bin Su and Qingping Wang, «Study on the Voltage Traveling Wave wavefront Detection for CVT», 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2005.1547175.
15. E. Schweitzer, B. Kasztenny, V. Skendzic, «High-fidelity voltage measurement using a capacitance-coupled voltage transformer», US Patent No. 10802054 B2, Date of Patent: Oct. 13, 2020.
16. Христофоров, В.А. Применение электромагнитного трансформатора тока в волновой РЗА / В.А. Христофоров, М.В. Убасева, В.С. Петров, А.О. Федоров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 396-399.
17. A.M. Elhaffar, «Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves», doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, March 2008, 141 p.
18. M. Ubaseva, V. Petrov and V. Antonov, «The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutral,» 2020

- International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020, pp. 394-399, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216306.
19. F.V. Lopes, K.M. Dantas, K.M. Silva and F.B. Costa, «Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves,» in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 873-880, April 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2711262.
20. Lei Wang, Hui Liu, Le Van Dai and Yuwei Liu, «Novel Method for Identifying Fault Location of Mixed Lines» Energies 2018, pp. 1 – 19; doi:10.3390/en11061529.
21. S. Marx, Y. Tong and M.V. Mynam, «Traveling-Wave Fault Locating for Multiterminal and Hybrid Transmission Lines», 45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane, October 16–18, 2018.
22. Aoyu Lei, X. Dong and S. Shi, «A novel method to identify the travelling wave reflected from the fault point or the remote-end bus,» 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7285725.
23. A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong and M.V. Mynam, «Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications,» 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX, 2018, pp. 1-18.
24. A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong, and M.V. Mynam, «Accurate Single-End Fault Locating Using Traveling-Wave Reflection Information,» 14th International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, United Kingdom, March 12–15, 2018.
25. A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong, and M.V. Mynam, «Electric Power Fault Protection Device Using Single-Ended Traveling Wave Fault Location Estimation,» US Patent № US10585133 B2. Date of Patent: Mar. 10, 2020.
26. A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov and V. Hristoforov, «Theory of Single-end Traveling Wave Fault Location,» 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 68-74, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.
27. US 8990036 B1, МПК G06F19/00, G01R31/08, G01R31/11. Power line parameter adjustment and fault location using traveling waves: опубл. 24.03.2015 / E.O. Schweitzer, III, M.V. Mynam, A. Guzman-Casillas, V. Skendzic, B.Z. Kasztenny, D.E. Whitehead.
28. Патент N 2767287 Российская Федерация, МПК G01R 31/08 (2006.01). Способ одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи: N 2021117705: заявл. 18.06.2021; опубликовано 17.03.2022 / Фёдоров А.О., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А.; заявитель Фёдоров А.О. - 16 с.: ил. - Текст: непосредственный.
29. A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov, D. Arkadiev, «Traveling Wave Fault Location Reliability Improving», 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 278-282, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559617.
30. Патент N 2790629 Российская Федерация, МПК G01R 31/08 (2006.01), H02H 1/00 (2006.01). Способ одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи: N 2022126015: заявл. 05.10.2022; опубликовано 28.02.2023 / Фёдоров А.О., Солдатов А.В., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А.; заявитель: Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА» - 18 с.: ил. - Текст: непосредственный.
31. Пат. 2603247 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи / Куликов А.Л., Ананьев В.В., Вуколов В.Ю. - № 2015139545/28; заявл. 17.09.2015. опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33. – 8 с.
32. Патент N 2774050 Российская Федерация, МПК G01R 31/08 (2006.01). Способ двухстороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи: N 2021124804: заявл. 20.08.2021; опубликовано 14.06.2022 / Фёдоров А.О., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А., Дони Н.А.; заявитель: Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА» - 11 с.: ил. - Текст: непосредственный.
33. СТО 56947007-33.060.40.052-2010 Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35-750 кВ переменного тока. Утвержден и введен в действие Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 30.06.2010 № 454.