

УДК 621.315

## Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач

А.Л. Куликов, В.В. Ананьев  
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: an-vitek@ya.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** При оценке расстояния волновым методом определения мест повреждения не учитываются конструктивные особенности линии электропередачи. Отсутствует адаптация волновых методов к изменениям параметров. В связи с этим актуальным является реализация адаптивного подхода, ориентированного на особенности конкретной ЛЭП и позволяющего уменьшить ошибки оценки расстояния до места повреждения.

**Материалы и методы:** Методологической основой адаптации волнового определения места повреждения являются эксперименты на имитационных моделях линий электропередач.

**Результаты:** Установлено, что погрешность волновых методов определения места повреждения соизмерима с погрешностью по параметрам аварийного режима (до 5 % от длины ЛЭП). Разработан метод адаптации волнового определения места повреждения, основанный на имитационном моделировании и учитывающий специфику каждой конкретной защищаемой ЛЭП.

**Выводы:** Адаптивный метод позволяет существенно снизить ошибки при оценке расстояния до места повреждения, может быть внедрен как в существующие, так и в перспективные устройства волнового определения места повреждения.

**Ключевые слова:** линия электропередач, волновой метод определения места повреждения, скорость распространения электромагнитных волн.

## Adaptive travelling wave fault location in power transmission lines

A.L. Kulikov, V.V. Ananiev  
Nizhny Novgorod state technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: an-vitek@ya.ru

### Abstract

**Background:** When the distance is determined by the traveling wave fault location method, the design features of power transmission lines are not taken into account; wave methods are not adapted to changes in parameters. Therefore, it is now urgent to implement an adaptive approach oriented to the characteristics of certain power transmission lines and minimizing the errors of distance measurement prior to the fault occurrence.

**Materials and methods:** The adaptive travelling wave fault location method is based on power line simulation model experiments.

**Results:** It has been determined that the error of the travelling wave fault location methods is comparable to that of fault location by emergency parameters (up to 5% of the power transmission line length). A method of adapting the travelling wave fault location method has been developed based on simulation and taking into account specific features of individual power transmission lines.

**Conclusions:** The adaptive method reduces the errors in measuring the distance to the fault place and can be embedded into existing and prospective travelling wave fault location devices.

**Key words:** power transmission lines, travelling wave fault location, travelling wave speed.

Волновое определение места повреждения (ВОМП) ЛЭП является перспективным в применении как в российских [5], так и в зарубежных [3, 4, 6–10] электрических сетях, так как обладает высокой точностью.

Основу метода составляет регистрация электромагнитных волн, распространяющихся от места повреждения со световой скоростью к концам ЛЭП. Конструктивные параметры ЛЭП определяют соответствующую скорость распространения электромагнитных волн. Неточная оценка скорости распространения электромагнитной волны ведет к появлению ошибок в оценке расстояния методами ВОМП.

В связи с этим необходимо исследование ошибок ВОМП, вызванных конструктивными особенностями ЛЭП, а также разработка адаптивного подхода для повышения точности оценки расстояния до места повреждения.

Скорость распространения электромагнитной волны определяется реактивным сопротивлением ЛЭП:

$$v = \frac{\omega}{\operatorname{Im}(\sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)})}, \quad (1)$$

и ее изменением вдоль длины линии. Однако при расчетах места повреждения для ВОМП:

$$d = 0,5[L + v(t_r - t_i)], \quad (2)$$

как правило, принимается постоянная скорость  $v = c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

В [1, 2] проводились исследования зависимости реактивного сопротивления ЛЭП от частоты и найдены диапазоны возможных значений скорости распространения электромагнитных волн (рис. 1).

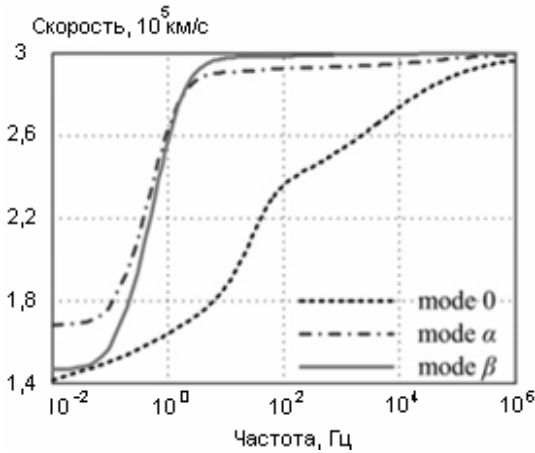


Рис. 1. Зависимость скорости волны от частоты

Указанные зависимости позволяют оценить потенциальные ошибки двустороннего метода ВОМП путем дифференцирования (2):

$$\Delta d = 0,5 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot l, \quad (3)$$

где  $l$  – длина линии;  $v$  – реальная скорость распространения электромагнитной волны;  $c$  – расчетная скорость распространения электромагнитной волны (принята равной скорости света).

Для скорости распространения  $v = 2,98 \cdot 10^5$  км/с по выражению (3) найдены ошибки оценки расстояния до места повреждения (рис. 2).

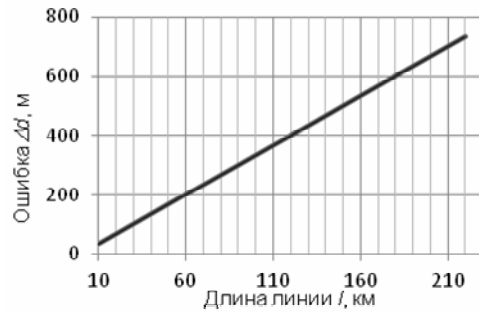


Рис. 2. Зависимость ошибки оценки расстояния до места повреждения от длины линии

Возможен и более сложный подход при оценке погрешности [2]:

$$\Delta d = \frac{(k - h)L - (k + h + 2kh)c(t_2 - t_1)}{2(2 + k + h)}, \quad (4)$$

где  $k, h$  – относительное изменение реальной скорости волн  $v_1$  и  $v_2$  (приходящих к концам ЛЭП);  $k = \Delta v_1/c, h = \Delta v_2/c$ .

Анализ полученной зависимости (рис. 2) показывает, что если в расчетных выражениях не учитывать реальную скорость волны, то ошибки велики и могут быть соизмеримы с ошибками ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима (до 5 % от длины ЛЭП).

Разработанный нами метод адаптации ВОМП основан на имитационном моделировании и использовании корректирующих коэффициентов, учитывающих специфику каждой конкретной ЛЭП.

В качестве иллюстрации продемонстрируем применение адаптивного ВОМП к ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы (рис. 3). Линия представлена участками, обладающими отличительными параметрами (табл. 1, 2). В представленных данных учтен режим заземления грозотроса и схема фазировки вдоль ЛЭП, а также реальная нагрузка линии.

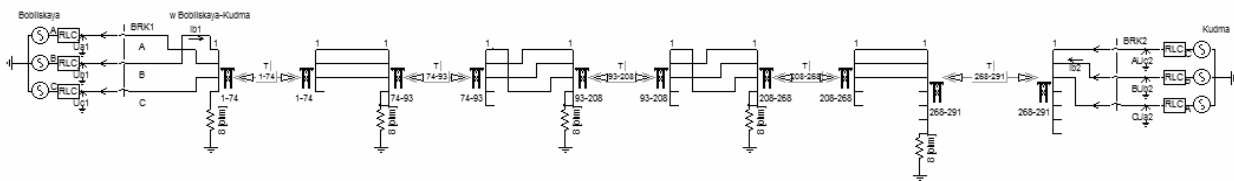


Рис. 3. Модель линии 220 кВ Бобыльская-Кудьма

Таблица 1. Характеристики участков

Номер участка	Длина участка, км	Марка провода	Марка грозотроса	Тип опоры	Стрела провеса, м	Сопротивление грунта
1	19,55	АСО-400	С-70	ПБ 220-4	8	100
2	7,74	АСО-400	2 x С-70	П 21	8	100
3	46,83	АСО-400	2 x С-70	П 21	8	500
4	23,70	АСО-400	2 x С-70	П 21	8	40
5	6,95	АСО-400	С-70	П 220-2	8	50

Таблица 2. Расчетные параметры участков

Номер участка	Удельные сопротивления на частоте 50 Гц, Ом		Удельная проводимость на частоте 50 Гц, мкСм		Скорость электромагнитной волны, км/с
	Собственное	Взаимное	Собственная	Взаимная	
1	0,123+0,736j	0,048+0,302j (0,048+0,320j)	2,39j (2,50j)	-0,31j (-0,45j)	298930
2	0,122+0,737j	0,047+0,263j (0,047+0,306j)	2,31j (2,38j)	-0,21j (-0,45j)	297807
3	0,124+0,786j	0,048+0,312j (0,048+0,355j)	2,31j (2,38j)	-0,21j (-0,45j)	299227
4	0,121+0,709j	0,046+0,235j (0,046+0,279j)	2,31j (2,38j)	-0,21j (-0,45j)	299028
5	0,119+0,716j (0,119+0,718j)	0,045+0,251j (0,046+0,291j)	2,25j (2,38j)	-0,26j (-0,52j)	297473

Адаптация осуществляется путем проведения серии экспериментов коротких замыканий на имитационной модели линии, в ходе которых фиксируется по превышению порогового значения время прихода электромагнитных волн от точки повреждения. По полученным оценкам времени производится расчет расстояния до места повреждения по двустороннему методу волнового ОМП (2).

Сопоставление расчетных расстояний с реальным моделируемым расстоянием до места повреждения позволяет вычислить корректирующий коэффициент  $\Delta d$ , который будет зависеть от места повреждения. Для обеспечения точного результата при оценке расстояния до повреждения на реальной ЛЭП предлагается использовать корректирующий коэффициент:

$$d = d_{\text{расч}} + \Delta d(d_{\text{расч}}), \quad (5)$$

где  $d_{\text{расч}}$  – расчетное расстояние до места повреждения по выражению (2);  $d$  – уточненное расстояние до места повреждения с использованием адаптации к параметрам ЛЭП.

Были проведены опыты короткого замыкания на ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма и найдено соотношение действительного расстояния до места повреждения и расчетного для двустороннего волнового ОМП. По результатам экспериментов с имитационной моделью и расчетов ВОМП получена зависимость корректирующего коэффициента от длины линии (рис. 4). Дополнительно к двустороннему ВОМП (рис. 4,а) исследовалось и одностороннее ВОМП (рис. 4,б).

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что максимальная ошибка двустороннего ВОМП для ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма длиной 105 км может достигать 250 м, а для одностороннего ВОМП – 600 м. Погрешность оценки расстояния по двустороннему методу может принимать как положительное, так и отрицательное значение, в зависимости от того, на какой половине линии произошло повреждение.

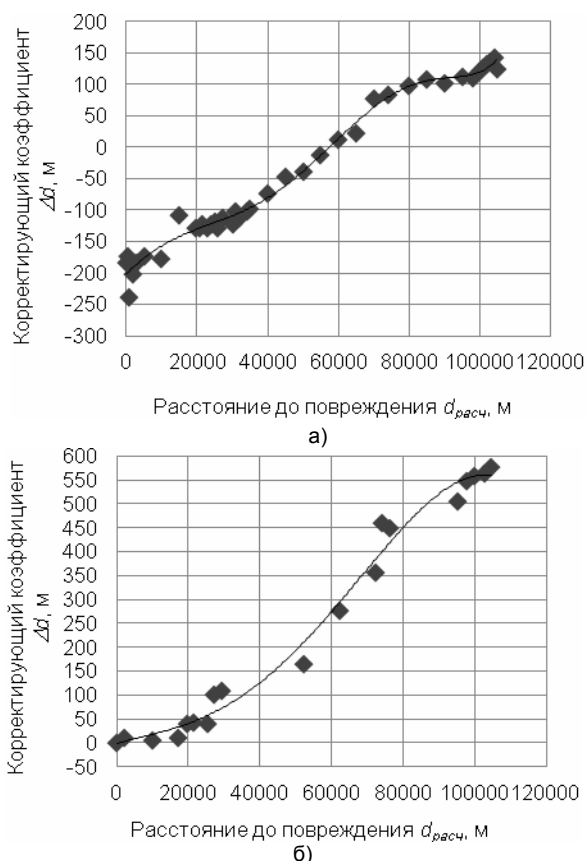


Рис. 4. Зависимость корректирующего коэффициента  $\Delta d$  для линии 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы от имитируемого места повреждения для двустороннего (а) и одностороннего (б) ВОМП

Следует отметить ряд особенностей, влияющих на точностные характеристики ВОМП и реализацию адаптивного подхода:

- сопротивление и вид повреждения не влияют на время распространения сигналов по ЛЭП;

- на амплитуду напряжения и скорость затухания сигналов влияют сопротивление в точке повреждения, сопротивление системы и геометрия опор.

В ходе имитационных экспериментов проводился анализ воздействия различных факторов на скорость распространения электромагнитных волн по ЛЭП, а также ошибок ВОМП. В качестве примера влияющего параметра рассматривалась температура провода

ЛЭП. Температура соотносится с величиной тока в проводе, а также текущими погодными условиями: температурой воздуха, ветром, солнечным излучением и др. Известны методы, позволяющие вычислить значение температуры провода с точностью 5–10 °С. Учитывая марку и температуру провода, а также длину пролета, можно оценить его стрелу провеса в пролете ЛЭП. Изменение температуры провода приводит к изменению его удельного активного сопротивления, которое влияет на скорость распространения (1) и затухания электромагнитной волны.

На рис. 5 представлены зависимости корректирующего коэффициента (ошибок ВОМП) от температуры провода ЛЭП, выраженные в изменениях стрелы провеса, а также изменениях удельного активного сопротивления. Для простоты моделирования предполагалось, что изменение температуры происходит одновременно по всей длине моделируемой линии 220 кВ Бобыльская-Кудьма.

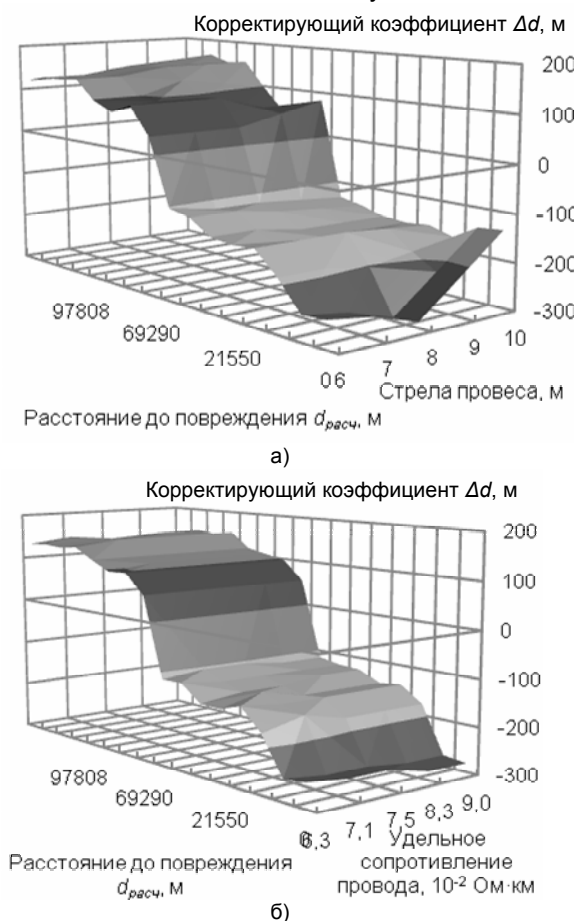


Рис. 5. Зависимости корректирующего коэффициента  $\Delta d$  (ошибок ВОМП) от температуры провода ЛЭП, выраженные в изменениях стрелы провеса (а), а также удельного активного сопротивления провода (б)

На протяженных ЛЭП условие одинаковости температуры провода на всех участках может не соблюдаться, что приводит к дополнительным ошибкам. Однако анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что изменение и неучет температуры провода при

расчетах ВОМП ведут к ошибкам в силу изменений:

- стрелы провеса (до 150 м);
- удельного активного сопротивления (до 50 м).

Таким образом, совокупная ошибка может достигать 200 м.

При технической реализации адаптивного ВОМП целесообразно получить совокупность зависимостей корректирующих коэффициентов по всем факторам, влияющим на точность оценки расстояния, и хранить в памяти устройства, реализующего расчетные операции. Имея средства оценки значений влияющих факторов (температура провода, сопротивление грунта, влажность воздуха и др.), целесообразно осуществлять выборку из памяти корректирующего коэффициента, соответствующего замеренным значениям факторов, для уточнения расстояния до места повреждения ЛЭП.

Такое техническое решение позволит обеспечить высокую точность ВОМП, адаптированного к особенностям исполнения и режимов работы конкретной ЛЭП, путем применения имитационных моделей.

## Заключение

Расчетные соотношения ВОМП предполагают однородность параметров ВОМП. Изменения скорости распространения электромагнитных волн в зависимости от конструктивных особенностей и параметров отдельных участков протяженных ЛЭП могут приводить к ошибкам до километра и более.

Имитационное моделирование ВОМП на ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы показало, что неучет реальной скорости распространения электромагнитной волны по линии приводит к ошибкам: для двустороннего метода – 250 м, а для одностороннего – 600 м.

Предложенный адаптивный подход для высокоточного ВОМП ЛЭП основан на использовании корректирующих коэффициентов, полученных по результатам имитационного моделирования. Адаптивный метод может быть внедрен как в существующие, так и в перспективные устройства ВОМП, его целесообразно распространить на другие методы ОМП, а также различные виды защит.

## Список литературы

1. Lin S., He Z.Y., Li X.P., Qian Q.Q. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2012. – № 6 – С. 764–772.
2. Yi-ning Z., Yong-hao L., Min X., Ze-xiang C. A novel algorithm for HVDC line fault location based on variant travelling wave speed // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT) – 2011. – С. 1459–1463.

3. Xiangjun Z., Li K. K., Zhengyi L., Xianggen Y., Xiangun Z. Fault location using traveling wave for power networks // Industry Applications Conference. – 2004. – № 4 – С. 2426–2429.

4. Deng F., Zeng X., Bo Z., Ma S., Zhou S. An improved network-based traveling wave fault location method // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – 2011. – С. 1–4.

5. БРС-07.090Т-Д001 РЭ. Микропроцессорное устройство определения места повреждения Бреслер-0107.090. Руководство по эксплуатации (редакция от 22 февраля 2013 года) // Научно-производственное предприятие «Бреслер», – Чебоксары, 2013. – 146 с.

6. Xiangjun Z., Yunfeng X., Hongjiang M., Yuanyuan W. Grounding faulted feeders detection methods applied in Chinese ineffectively earthed distribution systems // Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference. – 2007. – С. 1348–1351.

7. Traveling wave fault location in power transmission systems: a white paper, 5900 Southwest Parkway, Suite 210 Austin, Texas 78735.

8. Wang B., Wang B., Dong X., Cui T., Lui K., Cao R., Huang T., Bo Z. HPR7000 traveling wave based fault recording and location system in EHV lines // The international conference on electrical engineering. – 2009.

9. Локаторы повреждений в высоковольтных электрических сетях на основе метода бегущей волны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.qualitrolcorp.ru.com/Products/Fault\\_Recording\\_and\\_Fault\\_Location/Traveling\\_Wave\\_Fault\\_Locators/](http://www.qualitrolcorp.ru.com/Products/Fault_Recording_and_Fault_Location/Traveling_Wave_Fault_Locators/)

10. Overhead line fault locator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.isatest.com/index.php?page=tfs-2100>

#### References

1. Lin, S., He, Z.Y., Li, X.P., Qian, Q.Q. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, vol. 6, issue 8, pp. 764–772.

2. Yi-ning, Z., Yong-hao, L., Min, X., Ze-xiang, C. A novel algorithm for HVDC line fault location based on variant travelling wave speed. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011, pp. 1459–1463.

3. Xiangjun, Z., Li, K.K., Zhengyi, L., Xianggen, Y., Xiangun, Z. Fault location using traveling wave for power networks. Industry Applications Conference, 2004, vol. 4, pp. 2426–2429.

4. Deng, F., Zeng, X., Bo, Z., Ma, S., Zhou, S. An improved network-based traveling wave fault location method. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp. 1–4.

5. BRS-07.090Т-Д001 РЕ. Микропроцессорное устройство определения места повреждения Бреслер-0107.090. Руководство по эксплуатации (редакция от 22 февраля 2013 года) [The microprocessor device of fault location Bresler-0107.090. Operation manual (edition dated February 22, 2013)]. Cheboksary, 2013. 146 p.

6. Xiangjun, Z., Yunfeng, X., Hongjiang, M., Yuanyuan, W. Grounding faulted feeders detection methods applied in Chinese ineffectively earthed distribution systems. Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference, 2007, pp. 1348–1351.

7. Traveling wave fault location in power transmission systems: a white paper, 5900 Southwest Parkway, Suite 210 Austin, Texas 78735.

8. Wang, B., Wang, B., Dong, X., Cui, T., Lui, K., Cao, R., Huang, T., Bo, Z. HPR7000 traveling wave based fault recording and location system in EHV lines. The international conference on electrical engineering, 2009.

9. Lokatory povrezhdeniy v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh na osnove metoda begushchey volny [Travelling wave fault locators for high-voltage electric networks]. Available at: [http://www.qualitrolcorp.ru.com/Products/Fault\\_Recording\\_and\\_Fault\\_Location/Traveling\\_Wave\\_Fault\\_Locators/](http://www.qualitrolcorp.ru.com/Products/Fault_Recording_and_Fault_Location/Traveling_Wave_Fault_Locators/)

10. Overhead line fault locator. Available at: <http://www.isatest.com/index.php?page=tfs-2100>

*Куликов Александр Леонидович,*

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева,  
доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,  
e-mail: an-vitek@ya.ru

*Ананьев Виталий Вениаминович,*

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева,  
аспирант кафедры электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника,  
e-mail: an-vitek@ya.ru