

А.О. ФЁДОРОВ, В.С. ПЕТРОВ, В.А. ХРИСТОФОРОВ

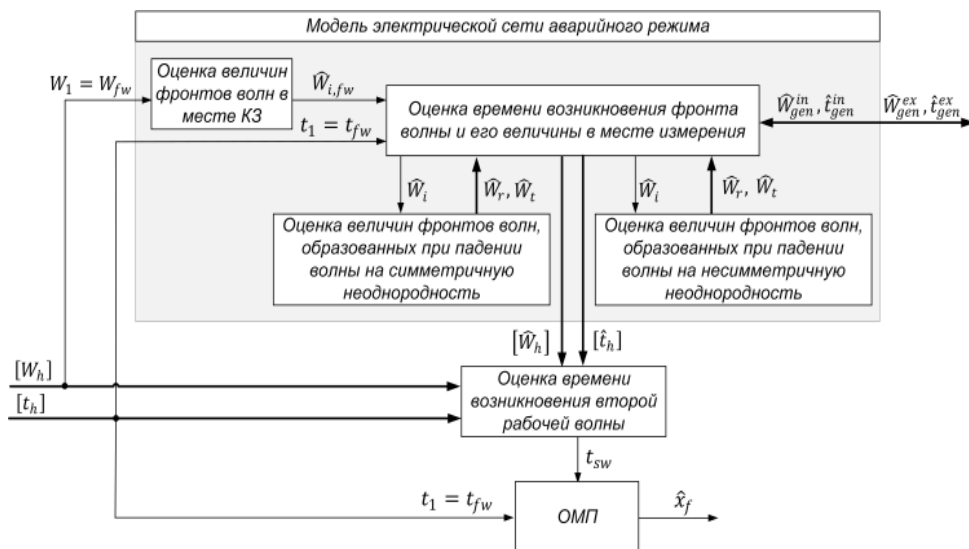
## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА В ОДНОСТОРОННЕМ МЕТОДЕ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Ключевые слова:** аварийный режим, односторонний метод волнового определения места повреждения, фронт волны, короткое замыкание.

*В односторонних волновых методах определения места повреждения для установления фронта волны, время возникновения которого определяется положением короткого замыкания на линии электропередачи, итерационно строятся модели электрической сети аварийного режима. Из всех моделей выбирается та, которая позволяет по величине фронта первой волны и моменту его возникновения сформировать оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, наиболее близкие к соответствующим величинам, определенным по измерениям устройства. На основе выбранной модели электрической сети аварийного режима идентифицируют рабочий фронт волны и определяют место короткого замыкания. Известные реализации одностороннего метода волнового определения места повреждения используют упрощенные модели электрической сети аварийного режима: не берется в расчет влияние вида короткого замыкания и его сопротивления, а также параметров элементов сети на величины фронтов волн. Указанные недостатки могут вызвать как повышенную погрешность определения места повреждения, так и отказ в работе устройства. В настоящей работе изложена теория построения модели электрической сети аварийного режима, а именно: влияние места короткого замыкания и его вида на величины фронтов волн. Особое внимание уделено изучению вопроса распределения составляющих волновых каналов при переходе волн места короткого замыкания. Показано, что для правильного определения рабочего фронта волны в модели электрической сети аварийного режима помимо длины линии электропередачи и ее волновых сопротивлений необходимо учитывать вид короткого замыкания и его сопротивление, а также возникновение фронтов волн в одном волновом канале под воздействием фронтов волн другого волнового канала.*

Для определения места повреждения (ОМП) в односторонних волновых методах распознают среди всех фронтов волн, возникших в месте измерений, фронт волны, время возникновения которого определяется положением короткого замыкания (КЗ) на линии электропередачи (ЛЭП) (далее – рабочий фронт волны) [6–8]. Для этого строятся модели электрической сети аварийного режима (ЭСАР) (рисунок).

Из всех моделей выбирается та, которая позволяет по величине фронта первой волны и моменту его возникновения сформировать оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, наиболее близкие к соответствующим величинам, определенным по измерениям [9]. На основе выбранной модели ЭСАР идентифицируют рабочий фронт волны и определяют место КЗ. Из вышеизложенного следует, что точность и устойчивость функционирования устройства, реализующего односторонний метод волнового ОМП, напрямую зависят от правильности построения модели ЭСАР.



Типовая структурная схема способа одностороннего волнового ОМП:

$[W_h], [t_h]$  – величины фронтов волн и времена их возникновения, определенные по измерениям;  $[\widehat{W}_h], [\hat{t}_h]$  – оценки величин фронтов волн и оценки времен их возникновения в месте измерений, сформированные с использованием модели электрической сети аварийного режима;  $W_{fw}, t_{fw}$  – величина первого измеренного фронта волны и время его возникновения;

$\widehat{W}_{i, fw}$  – оценка величины первого фронта волны, падающей на место измерений;

$\widehat{W}_i, \widehat{W}_r, \widehat{W}_t$  – оценки величин фронтов падающей, отраженной и преломленной волн, сформированные с использованием модели электрической сети аварийного режима;

$\widehat{W}_{gen}^{ex}, \widehat{W}_{gen}^{in}, \hat{t}_{gen}^{ex}, \hat{t}_{gen}^{in}$  – оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, образованных в волновых каналах в результате взаимного влияния

Из всех моделей выбирается та, которая позволяет по величине фронта первой волны и моменту его возникновения сформировать оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, наиболее близкие к соответствующим величинам, определенным по измерениям [9]. На основе выбранной модели ЭСАР идентифицируют рабочий фронт волны и определяют место КЗ. Из вышеизложенного следует, что точность и устойчивость функционирования устройства, реализующего односторонний метод волнового ОМП, напрямую зависят от правильности построения модели ЭСАР.

В модели ЭСАР времена возникновения фронтов волн в месте измерений могут быть оценены по известной скорости распространения волны в волновом канале и пути, пройденного ею от места КЗ [5], [9].

В настоящей работе иллюстрируются особенности построения модели ЭСАР при определении оценок величин фронтов волн в месте измерений.

Анализ проводится с использованием составляющих волновых каналов, являющихся контролируемой величиной устройства волнового ОМП [1].

Так как трехфазное и двухфазное КЗ на землю развиваются из однофазного или двухфазного КЗ [2], то в данной работе они не рассматриваются.

**Однофазное КЗ.** Так как для фазных напряжений  $u_{\vartheta}$ ,  $\vartheta = \overline{A, B, C}$  симметричной ЛЭП справедливо [4]

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \\ u_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $u_{\alpha}$ ,  $u_{\beta}$ ,  $u_0$  – составляющие двух междуфазных и нулевого волновых каналов, и при однофазном КЗ  $u_{\beta} = 0$ , то для напряжений  $u_{f,\vartheta}$  в месте однофазного КЗ (в качестве примера рассмотрим КЗ фазы  $A$ ) можно записать [9]

$$u_{f,A} = u_{i,\alpha} + u_{i,0} + u_{r,\alpha} + u_{r,0}, \quad (2)$$

$$u_{f,B} = u_{f,C} = -\frac{1}{2}u_{i,\alpha} + u_{i,0} - \frac{1}{2}u_{r,\alpha} + u_{r,0}, \quad (3)$$

а для токов

$$\frac{u_{i,\alpha}}{z_{l,\alpha}} + \frac{u_{i,0}}{z_{l,0}} - \frac{u_{r,\alpha}}{z_{l,\alpha}} - \frac{u_{r,0}}{z_{l,0}} = i_{f,A} + i_{t,\alpha} + i_{t,0}, \quad (4)$$

$$-\frac{u_{i,\alpha}}{2z_{l,\alpha}} + \frac{u_{i,0}}{z_{l,0}} + \frac{u_{r,\alpha}}{2z_{l,\alpha}} - \frac{u_{r,0}}{z_{l,0}} = -\frac{i_{t,\alpha}}{2} + i_{t,0}, \quad (5)$$

где  $u_{i,\alpha}$ ,  $u_{i,0}$ ,  $u_{r,\alpha}$ ,  $u_{r,0}$  – величины фронтов падающих и отраженных волн напряжения в междуфазном  $\alpha$ - и нулевом волновом канале, соответственно;  $z_{l,\alpha}$ ,  $z_{l,0}$  – волновое сопротивление ЛЭП междуфазного  $\alpha$ - и нулевого волнового канала, соответственно;  $i_{f,A}$  – величина фронта волны тока КЗ;  $i_{t,\alpha}$ ,  $i_{t,0}$  – величины фронтов преломленных через место КЗ волн тока в междуфазном  $\alpha$ - и нулевом волновом канале, соответственно.

Кроме того справедливо

$$u_{f,A} = i_{f,A}R_f = i_{t,\alpha}z_{l,\alpha} + i_{t,0}z_{l,0}, \quad (6)$$

$$u_{f,B} = u_{f,C} = -\frac{1}{2}i_{t,\alpha}z_{l,\alpha} + i_{t,0}z_{l,0}, \quad (7)$$

где  $R_f$  – сопротивление в месте КЗ.

Из совместно решения (2)–(7) следует, что

$$\begin{cases} u_{r,\alpha} = -\frac{2z_{l,\alpha}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f}u_{i,\alpha} + u_{gen,\alpha}; \\ u_{r,0} = -\frac{z_{l,0}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f}u_{i,0} + u_{gen,0}, \end{cases}$$

где  $u_{gen,\alpha} = -\frac{2z_{l,\alpha}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f}u_{i,0}$  – величина фронта волны напряжения, возникшей в  $\alpha$ -канале при падении на место КЗ волны в нулевом канале;  $u_{gen,0} = -\frac{z_{l,0}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f}u_{i,\alpha}$  – величина фронта волны напряжения, возникшей в нулевом канале при падении на место КЗ волны в  $\alpha$ -канале.

В связи с тем, что волны в каналах распространяются с разной скоростью, то падать на место КЗ они будут в разное время. Следовательно, про-

цесс образования новых волн в результате их падения на место КЗ нужно рассматривать для каждой падающей волны отдельно.

Величины фронтов преломленных волн напряжения могут быть найдены по известным выражениям [3]

$$\begin{aligned}u_{t,\alpha} &= u_{i,\alpha} + u_{r,\alpha}, \\ u_{t,0} &= u_{i,0} + u_{r,0}.\end{aligned}$$

Величины фронтов отраженных и преломленных волн тока в  $\alpha$ - и нулевом волновых каналах могут быть найдены с учетом известных соотношений

$$\begin{aligned}i_{\alpha} &= \frac{u_{\alpha}}{z_{l,\alpha}}, \\ i_0 &= \frac{u_0}{z_{l,0}}.\end{aligned}\tag{8}$$

где  $u_{\alpha} = \overline{u_{r,\alpha}, u_{t,\alpha}}$ ,  $u_0 = \overline{u_{r,0}, u_{t,0}}$ .

**Двухфазное КЗ.** Так как при двухфазном КЗ (в качестве примера рассмотрим КЗ фаз  $B$  и  $C$ ) волны распространяются только в поврежденных фазах [3] и  $u_{\alpha} = u_0 = 0$ , то с учетом (1) для напряжений  $u_{f,\beta}$  в месте двухфазного КЗ можно записать

$$u_{f,B} = -u_{f,C} = u_{i,\beta} + u_{r,\beta},\tag{9}$$

а для токов

$$\frac{u_{i,\beta}}{z_{l,\beta}} - \frac{u_{r,\beta}}{z_{l,\beta}} = i_f + i_{t,\beta},\tag{10}$$

Кроме того, справедливо

$$u_{f,B} - u_{f,C} = i_f R_f,\tag{11}$$

$$u_{f,B} = -u_{f,C} = i_{t,\beta} z_{l,\beta}.\tag{12}$$

Совместное решение (9) – (12) позволяет определить отраженную волну напряжения:

$$u_{r,\beta} = -\frac{z_{l,\beta}}{R_f + z_{l,\beta}} u_{i,\beta}.$$

Тогда преломленная волна напряжения

$$u_{t,\beta} = \frac{R_f}{R_f + z_{l,\beta}} u_{i,\beta}.\tag{13}$$

Отраженные и преломленные волны тока могут быть определены по (8).

Из (13) видно, что при  $R_f = 0$  Ом через место двухфазного КЗ волны не преломляются. При  $R_f = 30$  Ом<sup>1</sup> и среднем волновом сопротивлении междуфазного волнового канала линии  $z_{l,\beta} = 390$  Ом из (13) также следует,

<sup>1</sup> Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. СТО 56947007-29.120.70.241-2017: утверждены и введены в действие приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 28.02.2017 № 82.

что величина фронта преломленной через место двухфазного КЗ волны составляет 7% от величины фронта падающей волны. В связи с чем модель ЭСАР должна быть разделена относительно места КЗ на две независимые части и взята только та из них, которая содержит место измерений. Это позволяет снизить количество оценок фоновых волн и, следовательно, упростить задачу распознавания рабочей волны.

**Выводы.** Исследование показало, что успешное распознавание волны, отраженной от места КЗ, требует учета в модели ЭСАР вида КЗ и его сопротивления. Так при однофазном КЗ необходимо учитывать возможность порождения составляющих в одном волновом канале под воздействием составляющих другого волнового канала. При двухфазном КЗ модель ЭСАР режима должна быть разделена относительно места КЗ на две независимые части и взята только та из них, которая содержит место измерений. Это позволяет снизить количество оценок фоновых волн и, следовательно, упростить задачу идентификации волны, отраженной от места КЗ.

#### Литература

1. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита. М.: Энергия, 1971. 375 с.
3. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
4. Alekseev P.V., Naumov V. Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.
5. Guzmán A., Kasztenny B., Tong Y., Mynam M.V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: 71<sup>st</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX, 2018, pp. 1–18.
6. Guzmán A., Kasztenny B., Tong Y., Mynam M.V. Accurate Single-End Fault Locating Using Traveling-Wave Reflection Information. In: 14<sup>th</sup> International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, United Kingdom, 2018, pp. 1–6.
7. Schweitzer E.O., Guzmán A., Mynam M. V., Skendzic V., Kasztenny B., Marx S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: 67<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2014, pp. 95–110, DOI: 10.1109/CPRE.2014.6798997.
8. Fedorov A., Petrov V., Afanasieva O., Zlobina I. Limitations of Traveling Wave Fault Location. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21–25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.
9. Fedorov A., Petrov V., Naumov V., Hristoforov V. Theory of single-end traveling wave fault location. In: Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021, pp. 68–74, 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.

---

**ФЁДОРОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ** – инженер-исследователь департамента автоматизации энергосистем, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (fedorov\_a@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8863-5956>).

**ПЕТРОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (petrov\_vs@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3667-1442>).

**ХРИСТОФОРОВ ВИТАЛИЙ АНДРЕЕВИЧ** – студент III курса факультета энергетики и электротехники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (hristoforov\_va@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3846-9299>).

**Aleksey O. FEDOROV, Vladimir S. PETROV, Vitaliy A. HRISTOFOROV**  
**ELECTRICAL NETWORK OF FAULT REGIME MODEL**  
**CONSTRUCT FEATURES IN A SINGLE-END TRAVELING WAVE**  
**FAULT LOCATION METHOD**

**Key words:** *fault regime, single-end traveling wave fault location method, traveling wave front, short circuit.*

*In the single-end traveling wave (TW) fault location methods, for determining TW front, the arrival time of which is determined by the place of the short circuit (SC) on the power line, electrical network of fault regime models are constructed. From the electrical network of fault regime models, only one is selected that allows, by the first TW front magnitude and its arrival time, to obtain estimations of the TWs fronts magnitudes and their arrival times which are closest to the corresponding quantities determined from locator measurements. Based on the selected electrical network of fault regime model the used TWs are identified and the fault place is determined. Known implementations of the single-end traveling wave fault location method use simplified electrical network of fault regime model: the influence of the fault type and its resistance, as well as the parameters of the electrical network elements, are not taken into account on the TWs fronts magnitude. These disadvantages can cause both an increased error in determining the fault location and even failure in the operation of the locator. In this article, the theory of constructing electrical network of fault regime model is presented: the influence of fault location and its type on the TWs fronts magnitude are considered. Particular attention is paid to the study of the issue of the TWs generation as a result of the cross-transmission effect. It is shown that in order to correctly determine the used TW front in the electrical network of fault regime model, in addition to the power line length and its characteristic impedance, it is necessary to take into account the short circuit type and its resistance, and the possible TWs generation in one mode under the influence of TWs in another one.*

#### References

1. Popov I.N., Lachugin V.F., Sokolova G.V. *Releynaya zashita, osnovannaya na kontrole perehodnix processov* [Relay protection based on transients control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 248 p.
2. Chernobrovov N.V. *Releynaya zashita* [Relay protection]. Moscow, Energy Publ., 1971, 375 p.
3. Shalit G.M. *Opreделение mesta povregdenia v electriceskix setyax* [Fault Location in Electrical Network]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 312 p.
4. Alekseev P.V., Naumov V. Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.
5. Guzmán A., Kasztenny B., Tong Y., Mynam M.V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: 71<sup>st</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX, 2018, pp. 1–18.
6. Guzmán A., Kasztenny B., Tong Y., Mynam M.V. Accurate Single-End Fault Locating Using Traveling-Wave Reflection Information. In: 14<sup>th</sup> International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, United Kingdom, 2018, pp. 1–6.
7. Schweitzer E.O., Guzmán A., Mynam M. V., Skendzic V., Kasztenny B., Marx S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: 67<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2014, pp. 95–110. DOI: 10.1109/CPRE.2014.6798997.

8. Fedorov A., Petrov V., Afanasieva O., Zlobina I. Limitations of Traveling Wave Fault Location. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21–25. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

9. Fedorov A., Petrov V., Naumov V., Hristoforov V. Theory of single-end traveling wave fault location. In: Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021, pp. 68–74. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.

---

**ALEKSEY O. FEDOROV** – Research Engineer, Power Systems Automation Department, EKRA Ltd, Russia, Cheboksary (fedorov\_a@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8863-5956>).

**VLADIMIR S. PETROV** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (petrov\_vs@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3667-1442>).

**VITALIY A. HRISTOFOROV** – 3<sup>rd</sup> year Student, Power Engineering Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (hristoforov\_va@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3846-9299>).

---

**Формат цитирования:** *Фёдоров А.О., Петров В.С., Христофоров В.А.* Особенности построения модели электрической сети аварийного режима в одностороннем методе волнового определения места повреждения линии электропередачи // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 133–139. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-133-139.