

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА БАЗЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Куликов Ф.А.

ИГЭУ им. В.И. Ленина, г. Иваново

### Аннотация

Широкомасштабное внедрение в энергетику цифровых технологий открывает новые возможности для повышения эффективности и экономичности ее функционирования. Одной из таких технологий является технология синхронизированных векторных измерений, которая уже нашла широкое применение в единой энергетической системе РФ для задачи мониторинга электромеханических переходных процессов и является актуальной для решения других насущных задач, таких, например, как определение места повреждения. Целью работы является разработка и исследование алгоритма определения места повреждения на воздушной линии электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений. Исследования производятся посредством математического моделирования в среде ATP/ATPDraw для моделирования линии электропередачи и в среде MATLAB для реализации алгоритма определения места повреждения и вспомогательных алгоритмов. Произведен анализ влияния погрешностей входных измерений токов и напряжений, а также некоторых искажающих замер факторов на точность расчета места повреждения. Выполнены вычислительные испытания по методу Монте-Карло. Анализ результатов испытаний на модели участка электрической сети 500 кВ показывает как высокую эффективность предложенного алгоритма определения места повреждения, так и хорошую перспективу применения технологии синхронизированных векторных измерений для двустороннего определения места повреждения.

**Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения, определение места повреждения, воздушная линия электропередачи, математическая модель.

## DEVELOPMENT OF FAULT LOCATION ALGORITHM BASED ON SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS

Filipp Kulikov

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo

### Abstract

An extensive implementation of digital technologies into the energy sector opens up new opportunities for increasing the efficiency and cost-effectiveness of its operation. One of these technologies is the synchronized phasor measurements technology which has already found wide application in Russian Federation national power grid for the electromechanical transients monitoring and is relevant for solving other pressing problems. The aim of the work is to develop and study an overhead line fault location algorithm based on synchronized phasor measurements. The research is conducted by means of mathematical modelling in the ATP/ATPDraw environment for simulation and the MATLAB environment for fault location and other auxiliary algorithms implementation. An input voltage and current measurements error influence analysis was made, as well as some factors distorting the measurements on the fault location accuracy. Computational experiments using the Monte-Carlo method were performed. An analysis of test-case results on a model of 500 kV power grid show both the high efficiency of the proposed fault location algorithm and the good prospects for using the synchronized phasor measurements technology for double-ended fault location.

**Keywords:** synchronized phasor measurements, fault location, overhead power transmission line, mathematical model.



## Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) являются одним из наиболее повреждаемых элементов электрической сети, на них приходится до 85 % всех повреждений [1–2]. От точности определения места повреждения (ОМП) напрямую зависит скорость ликвидации последствий аварий, а следовательно, и величина финансового ущерба, нанесенного ими. Широко применяемые сегодня методы дистанционного ОМП (ДОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) принято подразделять на односторонние и двусторонние [3]. Односторонние методы ОМП характеризуются меньшей точностью, особенно если точка короткого замыкания (КЗ) расположена на большом удалении от места замера или переходное сопротивление достаточно велико. Двусторонние методы ОМП считаются более точными, однако существует ряд проблем, связанных с их реализацией. Одной из таких проблем является необходимость точной синхронизации времени полукомплектов устройств ДОМП. В настоящее время методы ДОМП реализованы на базе специализированных программных комплексов, устанавливаемых на рабочих местах персонала подстанций или на базе микропроцессорных терминалов. В любом случае, синхронизация по времени ни микропроцессорных терминалов, ни регистраторов аварийных событий не регламентируется. Устройствами, способными обеспечить точную синхронизацию времени и сделать доступными методы ОМП по двустороннему замеру являются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ).

В настоящее время стандартом АО "СО ЕЭС" СТО 59012820.29.020.001-2019 регламентируется обязательная установка УСВИ на объектах энергетики 330 кВ и выше в общем случае и установка на объекты 220 кВ при соблюдении ряда условий. Технология СВИ уже нашла широкое применение для задач мониторинга в единой энергетической системе (ЕЭС) России и является крайне перспективной с точки зрения ее использования для задачи ОМП [4–6]. УСВИ позволяют выполнять замер фазных величин токов и напряжений с точной привязкой к спутниковой системе синхронизации времени, т.е. замеры токов и напряжений по концам ВЛЭП привязаны к меткам времени с точностью не хуже 1 мкс. Актуальность разработки алгоритмов ОМП на базе СВИ подтверждается большим количеством как зарубежных [7–8], так и Российских публикаций.

Целью работы является разработка нового алгоритма ОМП, основанного на решении переопределенной системы нелинейных уравнений, составленной для ВЛЭП, использующего в качестве входных данных замеры токов и напряжений от УСВИ.

## Материалы и методы

Исследование проводится на базе ВЛЭП 500 кВ с двусторонним питанием, являющейся частью электрической сети, представленной на рис. 1.

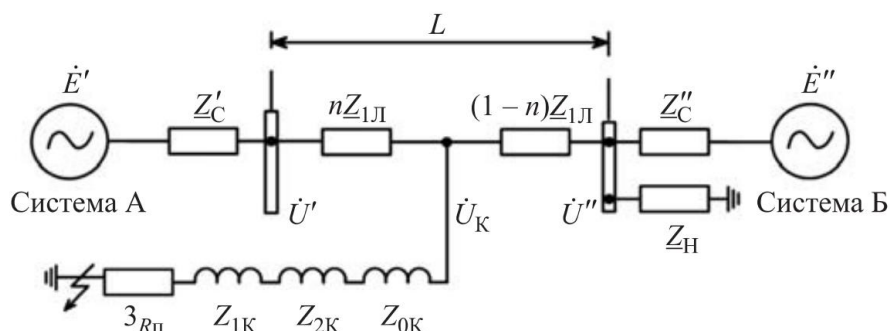


Рис. 1. Однолинейная схема исследуемой электрической сети



Кроме ВЛЭП участок сети включает две системы, нагрузку и шунт КЗ. Точка КЗ разделяет воздушную линию на два участка, КЗ - однофазное. Длина ВЛЭП составляет 220 км, учтена распределенность погонных параметров ВЛЭП, а кроме того, учтено влияние неидеальной транспозиции фазных проводников.

Разработанный метод ОМП основан на решении переопределённой системы нелинейных уравнений, включающей в себя в качестве неизвестных не только расстояние до места повреждения, но также и параметры схемы замещения ВЛЭП, а именно продольные сопротивления и поперечные проводимости. Используя законы Ома и Кирхгофа, записываются уравнения (1) – (6), описывающие левую часть ВЛЭП:

$$\dot{V}_{f1} - (\dot{V}_{beg1} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1) - \dot{I}_{beg1} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1)) = 0; \quad (1)$$

$$\dot{V}_{f2} - (\dot{V}_{beg1} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1) - \dot{I}_{beg2} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1)) = 0; \quad (2)$$

$$\dot{V}_{f0} - (\dot{V}_{beg0} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_1) - \dot{I}_{beg0} \cdot \underline{Z}_{w0} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_1)) = 0; \quad (3)$$

$$\dot{I}_{left\_f1} - \left( -\dot{V}_{beg1} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1)}{\underline{Z}_{w1}} + \dot{I}_{beg1} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1) \right) = 0; \quad (4)$$

$$\dot{I}_{left\_f2} - \left( -\dot{V}_{beg2} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1)}{\underline{Z}_{w1}} + \dot{I}_{beg2} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_1) \right) = 0; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{left\_f0} - \left( -\dot{V}_{beg0} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_1)}{\underline{Z}_{w0}} + \dot{I}_{beg0} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_1) \right) = 0; \quad (6)$$

Аналогично записываются уравнения (7) – (12), описывающие правую часть ВЛЭП:

$$\dot{V}_{end1} - (\dot{V}_{f1} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2) - \dot{I}_{right\_f1} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2)) = 0; \quad (7)$$

$$\dot{V}_{end2} - (\dot{V}_{f2} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2) - \dot{I}_{right\_f2} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2)) = 0; \quad (8)$$

$$\dot{V}_{end0} - (\dot{V}_{f0} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_2) - \dot{I}_{right\_f0} \cdot \underline{Z}_{w0} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_2)) = 0; \quad (9)$$

$$\dot{I}_{end1} - \left( -\dot{V}_{f1} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2)}{\underline{Z}_{w1}} + \dot{I}_{right\_f1} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2) \right) = 0; \quad (10)$$



$$I_{end2} - \left( -\dot{V}_{f2} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2)}{\underline{Z}_{w1}} + I_{right\_f2} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len_2) \right) = 0; \quad (11)$$

$$I_{end0} - \left( -\dot{V}_{f0} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_2)}{\underline{Z}_{w0}} + I_{right\_f0} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_0 \cdot len_2) \right) = 0; \quad (12)$$

И, наконец, записываются граничные условия однофазного КЗ (13) – (14), связывающие левую и правую части:

$$(\dot{I}_{left\_f1} - \dot{I}_{right\_f1}) - (\dot{I}_{left\_f0} - \dot{I}_{right\_f0}) = 0; \quad (13)$$

$$(\dot{I}_{left\_f1} - \dot{I}_{right\_f1}) - (\dot{I}_{left\_f2} - \dot{I}_{right\_f2}) = 0. \quad (14)$$

В выражениях (1) – (14) приняты следующие обозначения:

$\dot{V}_{beg1}$  и  $\dot{I}_{beg1}$  – СВИ напряжения и тока прямой последовательности в начале ВЛЭП для режима установившегося КЗ;

$\dot{V}_{beg2}$  и  $\dot{I}_{beg2}$  – то же для обратной последовательности;

$\dot{V}_{beg0}$  и  $\dot{I}_{beg0}$  – то же для нулевой последовательности;

$\dot{V}_{end1}$  и  $\dot{I}_{end1}$  – СВИ напряжения и тока прямой последовательности в конце ВЛЭП для режима установившегося КЗ;

$\dot{V}_{end2}$  и  $\dot{I}_{end2}$  – то же для обратной последовательности;

$\dot{V}_{end0}$  и  $\dot{I}_{end0}$  – то же для нулевой последовательности;

$\dot{V}_{f1}$ ,  $\dot{I}_{left\_f1}$  и  $\dot{I}_{right\_f1}$  – неизвестное напряжение прямой последовательности в точке КЗ и неизвестные токи прямой последовательности слева и справа от точки КЗ соответственно;

$\dot{V}_{f2}$ ,  $\dot{I}_{left\_f2}$  и  $\dot{I}_{right\_f2}$  – то же для обратной последовательности;

$\dot{V}_{f0}$ ,  $\dot{I}_{left\_f0}$  и  $\dot{I}_{right\_f0}$  – то же для нулевой последовательности;

$len_1$  и  $len_2$  – длины левой и правой частей ВЛЭП.

Для увеличения точности алгоритма ОМП возможно использовать комплект синхронизированных измерений, соответствующий доаварийному установившемуся режиму, описываемому уравнениями (15) – (20).

$$\dot{V}_{end1\_normal} - (\dot{V}_{beg1\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len) - \dot{I}_{beg1\_normal} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0; \quad (15)$$

$$I_{end1\_normal} - (-\dot{V}_{beg1\_normal} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)}{\underline{Z}_{w1}} + \dot{I}_{beg1\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0; \quad (16)$$

$$\dot{V}_{end2\_normal} - (\dot{V}_{beg2\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len) - \dot{I}_{beg2\_normal} \cdot \underline{Z}_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0; \quad (17)$$



$$I_{end2\_normal} - (-\dot{V}_{beg2\_normal} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)}{Z_{w1}} + I_{beg2\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0; \quad (18)$$

$$\dot{V}_{end0\_normal} - (\dot{V}_{beg0\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len) - I_{beg0\_normal} \cdot Z_{w1} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0; \quad (19)$$

$$I_{end0\_normal} - (-\dot{V}_{beg0\_normal} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)}{Z_{w1}} + I_{beg0\_normal} \cdot \cosh(\underline{\gamma}_1 \cdot len)) = 0. \quad (20)$$

В равенствах (15) – (20) приняты следующие обозначения:

$\dot{V}_{beg1\_normal}$  и  $I_{beg1\_normal}$  – СВИ напряжения и тока прямой последовательности в начале ВЛЭП для режима, предшествующего КЗ;

$\dot{V}_{beg2\_normal}$  и  $I_{beg2\_normal}$  – то же для обратной последовательности;

$\dot{V}_{beg0\_normal}$  и  $I_{beg0\_normal}$  – то же для нулевой последовательности;

$\dot{V}_{end1\_normal}$  и  $I_{end1\_normal}$  – СВИ напряжения и тока прямой последовательности в конце ВЛЭП для режима, предшествующего КЗ;

$\dot{V}_{end2\_normal}$  и  $I_{end2\_normal}$  – то же для обратной последовательности;

$\dot{V}_{end0\_normal}$  и  $I_{end0\_normal}$  – то же для нулевой последовательности.

Синхронизированные замеры токов и напряжений получаются с помощью модели ВЛЭП, собранной в программном комплексе ATP/ATPDraw, показанной на рис. 2.

Полученные замеры затем экспортируются в рабочее пространство MATLAB, где производится получение векторов токов и напряжений из мгновенных значений посредством специального алгоритма, реализованного на языке MATLAB, моделирующего работу УСВИ. Полученные векторы токов и напряжений затем искажаются в пределах заданной полной векторной погрешности, производится выделение отдельных симметричных составляющих и подготовка данных для использования в алгоритме ОМП. Используемый для расчета места повреждения комплект векторов соответствует установившемуся режиму КЗ.

## Результаты

Результаты вычислительных экспериментов по методу Монте-Карло при перемещении точки КЗ вдоль ВЛЭП при различных значениях полной векторной погрешности входных токов и напряжений представлены на рис. 3. На графике показаны математические ожидания приведенной погрешности для 10 различных точек повреждения вдоль ВЛЭП. Каждая кривая, выделенная цветом, соответствует различному значению полной векторной погрешности всех 12 токов и напряжений. Концепция полной векторной погрешности подробно изложена в стандарте IEEE C37.118.1-2011.

Анализ результатов показывает, что величина полной векторной погрешности, в пределах которой искажены входные векторы тока и напряжения, практически не влияет на среднее значение погрешности ОМП. Во всех случаях кроме одного (точка на удалении 156,2 км), математическое ожидание приведенной погрешности не выходит за пределы диапазонов допустимой погрешности, обозначенных в стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Непосредственно местоположение точки КЗ особого влияния на точность ОМП не оказывает, что справедливо для методов, основанных на двустороннем замере.



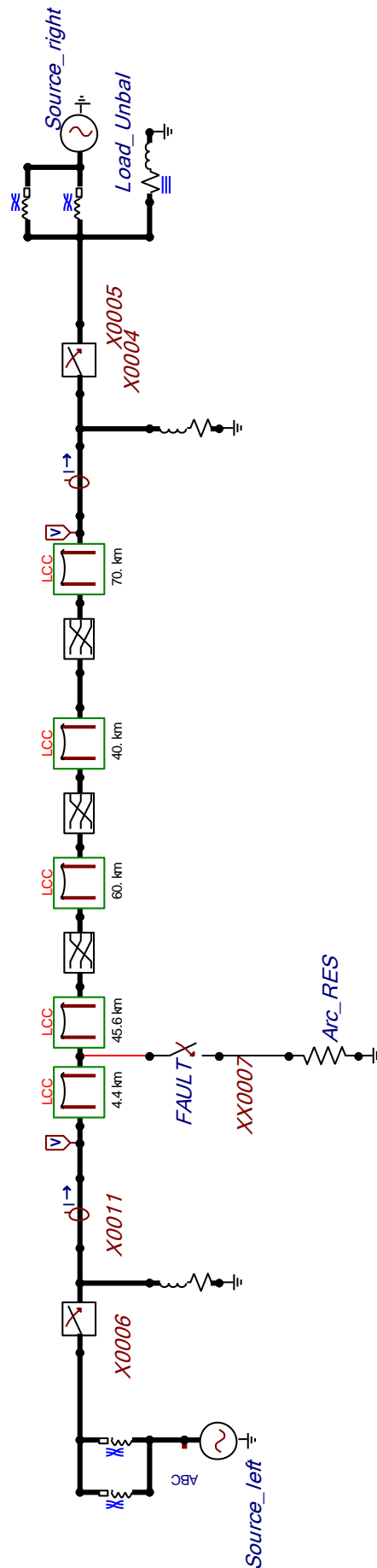
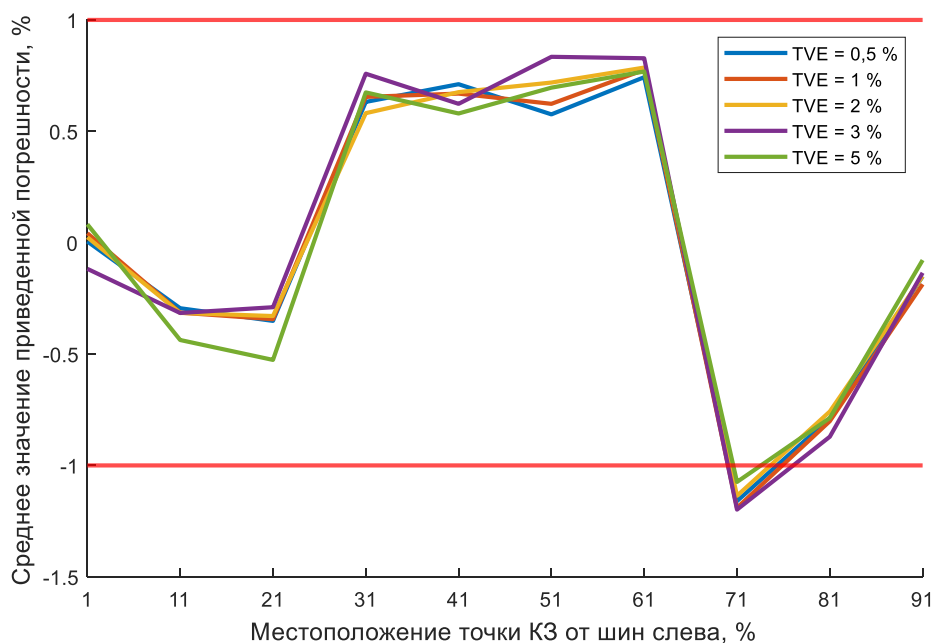
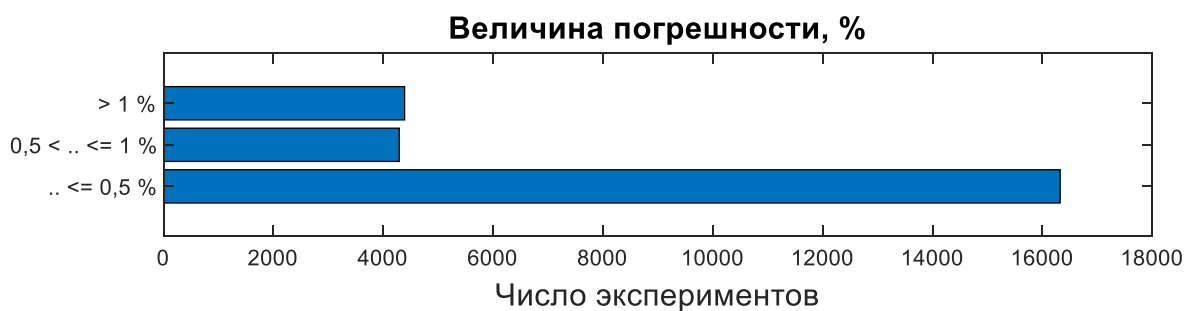


Рис. 2. Схема замещения исследуемой ВЛЭП в ATPDraw



**Рис. 3** Зависимость погрешности ОПП от места КЗ при различных значениях полной векторной погрешности входных векторов тока и напряжения

Кроме математического ожидания, важной характеристикой является суммарное количество точек, попавших в различные диапазоны погрешности ОПП. Регламентируемая точность двусторонних методов ОПП по ПАР составляет 1 %. На рис. 4 результаты 25 тысяч итераций по методу Монте-Карло сведены в несколько столбцов, соответствующих вхождению приведенной погрешности в диапазоны от 0 до 0,5 % (нижний столбец), от 0,5 до 1% (средний столбец) и выходящие за пределы 1 % (верхний столбец).



**Рис.4.** Количество точек, попавших в указанные диапазоны погрешности

Анализ результатов, представленных на рис. 4 показывает, что в 82 % случаев погрешность не превышает 1%.

## Выводы

С применением математического моделирования в среде ATP/ATPDraw и MATLAB проведен комплексный анализ эффективности разработанного двустороннего оптимизационного алгоритма ОПП, способного использовать несколько комплектов СВИ токов и напряжений. Анализ результатов испытаний на модели участка электрической сети, содержащей исследуемую ВЛЭП 500 кВ показал высокий потенциал применения не только предлагаемого алгоритма, но и технологии СВИ для ОПП в целом.



## Основные выводы:

1. Проведены численные испытания по методу Монте-Карло, показавшие высокую эффективность предложенного метода. Суммарно выполнено 25 тысяч итераций для различных точек повреждения на ВЛЭП. Так, более чем в 80 % случаев, приведенная погрешность не выходит за пределы регламентируемых диапазонов точности двухсторонних методов ОМП (1%), что свидетельствует о высокой точности метода и его высокой надежности.

2. Разработанный алгоритм, заключающийся в оптимизации переопределенной системы нелинейных уравнений, показывает высокую эффективность не только при условно идеальных входных векторах тока и напряжения, но и в случае, когда векторы умышленно искажаются с целью учета погрешностей реальных УСВИ.

## Библиографический список

1. Васильева М.В. Зарубежный опыт обеспечения надёжности электроснабжения // Вестник Волгоградского института бизнеса. 2013. № 4(25). С. 144-149. EDN: [RNAVNZ](#)
2. Гук Ю.Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 244 с.
3. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под. ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
4. Al-Mohammed A.H., Abido M.A. An adaptive fault location algorithm for power system networks based on synchrophasor measurements // Electrical Power Systems Research. 2014. V. 108. P. 153-163. DOI: [10.1016/J.EPSR.2013.10.013](#)
5. Usman M.U., Faruque M.O. Applications of synchrophasor technologies in power systems // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. V. 7(4). P. 211-226. DOI: [10.1007/S40565-018-0455-8](#)
6. Dobakhshari A.S., Ranjbar A.M. A novel method for fault location of transmission lines by wide-area voltage measurements considering measurement errors // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. V. 6(2). P. 874-884. DOI: [10.1109/TSG.2014.2322977](#)
7. Davoudi M., Sadeh J., Kamyab E. Transient-Based Fault Location on Three-Terminal and Tapped Transmission Lines Not Requiring Line Parameters // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. V. 33(1). P. 179-188. DOI: [10.1109/TPWRD.2017.2695653](#)
8. Suonan J., Zengchao W., Kang X. An accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation using one terminal data // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Beijing (China): IEEE, 2011. P. 407-412. DOI: [10.1109/APAP.2011.6180436](#)

## References

1. Vasil'eva, M. V. (2013). Zarubezhny`j opy`t obespecheniya nadyozhnosti e`lektrosnabzheniya [Foreign experience of ensuring reliability of power supply]. *Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa*, 4 (25), 144-149. [In Russian]
2. Guk, Yu. B. (1988). *Analiz nadezhnosti elektroenergeticheskikh ustanovok* [Analysis of reliability of electrical power installations]. Energoatomizdat. [In Russian].
3. Arzhannikov, E. A., Lukoyanov, V. Yu., & Misrihanov, M. Sh. (2003). *Opredelenie mesta korotkogo замыканиya na vysokovol'tnyh liniyah elektroperedachi* [Short circuit location on high-voltage power transmission lines]. Energoatomizdat. [In Russian].
4. Al-Mohammed, A. H., & Abido, M. A. (2014). An adaptive fault location algorithm for power system networks based on synchrophasor measurements. *Electrical Power Systems Research*, 108, 153-163. <https://www.doi.org/10.1016/J.EPSR.2013.10.013>.
5. Usman, M. U., & Faruque, M. O. (2019). Applications of synchrophasor technologies in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(4), 211-226. <https://www.doi.org/10.1007/S40565-018-0455-8>.



6. Dobakhshari, A. S., & Ranjbar, A. M. (2019). A novel method for fault location of transmission lines by wide-area voltage measurements considering measurement errors. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 874-884. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2322977>.
7. Davoudi, M., Sadeh, J., & Kamyab, E. (2018). Transient-Based Fault Location on Three-Terminal and Tapped Transmission Lines Not Requiring Line Parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1), 179-188. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2695653>.
8. Suonan, J., Zengchao, W., & Kang, X. (2011). An accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation using one terminal data. In *Proc from 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection* (pp. 407-412). IEEE. <https://www.doi.org/10.1109/APAP.2011.6180436>

#### Сведения об авторах

**Куликов Филипп Александрович**, аспирант кафедры Электрических систем. Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново.

SPIN-код: [6055-6661](#)

ORCID: [0000-0001-9991-8310](#)

#### Authors about

**Filipp Kulikov**, postgraduate student.

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russia

ORCID: [0000-0001-9991-8310](#)

