

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

**Филипп Александрович Куликов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: kulikov96@outlook.com

**Андрей Юрьевич Мурзин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Россия, Иваново, e-mail: deaneef@eef.ispu.ru

**Игорь Евгеньевич Иванов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: igor.e.ivanov.777@gmail.com

**Ярослав Александрович Умнов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: umnov2402@mail.ru

### **Исследование точности определения места повреждения воздушных линий по данным от устройств синхронизированных векторных измерений различных классов и производителей**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Технология синхронизированных векторных измерений нашла широкое применение в энергосистеме РФ для фиксации параметров установившихся электроэнергетических режимов и регистрации электромеханических переходных процессов. Исследованию аспектов определения места повреждения по данным синхронизированных векторных измерений посвящены главным образом зарубежные публикации. Существенным недостатком большинства рассмотренных публикаций является упрощенное моделирование как воздушных линий электропередачи, так и измерительных каналов тока и напряжения, а также цифровых фильтров устройств синхронизированных векторных измерений. Целью исследования является разработка алгоритма определения места повреждения на основе синхронизированных векторных измерений и исследование его точности при использовании реального оборудования, включая программно-аппаратный комплекс RTDS, усилители тока и напряжения фирмы PONOVO и промышленные устройства синхронизированных векторных измерений.

**Материалы и методы.** Двусторонний метод определения места повреждения разработан на основе синхронизированных векторных измерений с использованием уравнений длинной линии и известных концепций теории электромагнитных переходных процессов. Моделирование осциллограмм токов и напряжений с обоих концов воздушной линии производится в программном комплексе MATLAB/Simulink. Воспроизведение соответствующих COMTRADE-файлов осциллограмм осуществляется посредством программно-аппаратного комплекса RTDS и программной среды RSCAD. Кроме того, в исследовании применяются промышленное устройство синхронизированных векторных измерений ТПА-02 и устройство сопряжения ENMU, поддерживающее функцию синхронизированных векторных измерений, и таким образом выполняется виртуализация устройств синхронизированных векторных измерений по концам линии. Для синхронизации измерений и агрегации кадров данных синхронизи-

рованных векторных измерений задействовано различное вспомогательное оборудование и программное обеспечение (в частности, PMU Connection Tester).

**Результаты.** Разработан двусторонний метод определения места повреждения по параметрам аварийного режима, в качестве которых выступают синхронизированные векторные измерения по концам воздушной линии. Метод основан на решении переопределенной системы нелинейных уравнений, описывающих физические процессы, протекающие в воздушной линии электропередачи, и способен функционировать при различных видах коротких замыканий. Проведено комплексное исследование эффективности разработанного метода определения места повреждения и получены численные результаты погрешностей определения места повреждения при использовании промышленных устройств синхронизированных векторных измерений ENMU и ТПА-02, симулятора RTDS и другого оборудования. Рассмотрен случай установки по концам воздушной линии устройств синхронизированных векторных измерений разного класса, сконфигурированных, к тому же, на отличающуюся частоту выдачи кадров данных. В результате экспериментов выявлено, что приведенная погрешность определения места повреждения не превышает регламентируемых стандартом ПАО «ФСК ЕЭС» (СТО 56947007–29.120.70.241-2017) пределов погрешности в 88 % случаев.

**Выводы.** Разработанный метод определения места повреждения позволяет достичь требуемой нормативными документами точности расчета расстояния до точки короткого замыкания в большинстве рассмотренных случаев. По результатам проведенных численных экспериментов можно заключить, что при различных видах рассмотренных коротких замыканий частота выдачи кадров синхронизированных векторных измерений и конфигурирование по классу Р или М не оказывает существенного влияния на точность определения места повреждения, если длительность коротких замыканий достаточна для устойчивого расчета вектора аварийного режима.

**Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения, определение места повреждения, воздушные линии электропередачи, параметры аварийного режима, короткое замыкание

#### **Filipp Aleksandrovich Kulikov**

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kulikov96@outlook.com

#### **Andrey Yurievich Murzin**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of Electrical Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: deaneef@eef.ispu.ru

#### **Igor Evgenievich Ivanov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: igor.e.ivanov.777@gmail.com

#### **Yaroslav Aleksandrovich Umnov**

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: umnov2402@mail.ru

## **Study of accuracy of overhead transmission line fault location based on data of phasor measurement units of different configuration and manufacturers**

### **Abstract**

**Background.** The technology of synchronized phasor measurements has been widely used in the Russian power system to analyze the parameters of steady-state electrical power modes and to record electro-mechanical transient processes. Issues on fault location based on synchronized phasor measurements have mainly been discussed in foreign publications. A significant drawback of most research papers on this issue is simplified modeling of both overhead lines and current and voltage measurement channel as well as digital filters of phasor measurement units (PMUs). The goal of this research is to develop a fault location algorithm based on synchrophasor measurements and to study its accuracy by using specialized equipment including a real-time digital simulator (RTDS), PONOVO current and voltage amplifiers and production-grade PMUs.

**Materials and methods.** A PMU-based double-ended fault location algorithm is developed using long-line equations and well-known electromagnetic transient theory concepts. Currents and voltage oscillograms of both overhead transmission line ends are modelled in the MATLAB/Simulink software package. These oscillograms are saved as COMTRADE files and played back using the RTDS hardware and all-in-one software package RSCAD. In addition, the study uses two production-grade PMUs, the first one is TPA-02, and the second one is a merging unit ENMU acting as a PMU, thus imitating PMUs at the line terminals. To time-align all the measurements and to aggregate PMU data frames, various auxiliary software such as PMU Connection Tester, and hardware is used.

**Results.** A double-ended fault location (FL) method utilizing synchrophasors under a fault has been developed. The method is based on an overdetermined system of nonlinear equations that describes physical processes in an overhead power line and can be applied under various fault types. An integrated study of the efficiency of the developed FL method has been conducted. FL errors have been computed using production-grade PMUs ENMU and TPA-02, along with the RTDS and other equipment. The authors have considered the case of configuring PMUs of different classes at the overhead line terminals, and different phasor reporting rates as well. The conducted experiments make

it possible to reveal that the fault location errors do not exceed the thresholds imposed by the standard STO 56947007-29.120.70.241-2017 in 88 % of all the analyzed fault scenarios.

**Conclusions.** The developed FL method makes it possible to achieve the accuracy required by regulatory guide in calculating the distance to the short circuit point in most of the cases examined. Based on the results of numerical experiments for various types of fault cases, it can be concluded that the PMU class and phasor reporting rate do not have a significant impact on the FL accuracy, provided that the fault duration is enough for the PMU filter to approach a steady output.

**Key words:** synchronized phasor measurements, fault location, overhead transmission lines, emergency mode parameters, short circuit

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.1.044-052

**Введение.** Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предусматривает дальнейшее расширение и без того высокотехнологичной электросетевой инфраструктуры электроэнергетической системы (ЭЭС) РФ. Вместе с ростом числа единиц генерирующего оборудования, подстанций и протяженности кабельных и воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) ужесточаются требования к надежности и качеству энергоснабжения потребителей электрической энергии.

ВЛЭП, являясь одним из самых уязвимых элементов ЭЭС, ежегодно подвергаются множеству различных аварий, приводящих к существенному экономическому ущербу и временным затратам на устранение их последствий. Использование более совершенных методов определения места повреждения (ОМП) ВЛЭП позволит значительно сократить финансовые издержки и затраты времени.

Источником данных для новых методов и алгоритмов ОМП могут являться синхронизированные векторные измерения (СВИ), которые за последнее десятилетие стали все активнее использоваться для решения задачи ОМП [1–6]. Технология СВИ для энергосистемы Российской Федерации не нова и широко применяется для решения задач мониторинга ЭЭС в составе системы мониторинга переходных режимов (СМНР). Вместе с тем применение СВИ для задач анализа электромагнитных переходных процессов (в частности, сопровождающих короткие замыкания (КЗ) на ВЛЭП) является новым направлением для электроэнергетики РФ [7, 8]. Для полноценного применения данных СВИ в задаче ОМП требуется разработка новых методов ОМП, в которых в качестве параметров аварийного режима (ПАР) будут выступать синхронизированные вектора напряжений и токов, полученные от устройств СВИ (УСВИ) по концам ВЛЭП.

С учетом вышеизложенного поставлена задача разработки и тестирования метода ОМП на основе СВИ. Полноценная верификация теоретических положений достигается за счет использования физико-математического моделирования, при котором входные осциллограммы токов и напряжений являются математической имитацией реальных физических процессов в ЭЭС, а синхронизированные векторы рас-

считываются промышленными УСВИ двух различных производителей.

**Методы исследования.** Исследование величины погрешности ОМП предлагаемого алгоритма, описанного ниже, проводится на основе испытательного стенда (рис. 1).

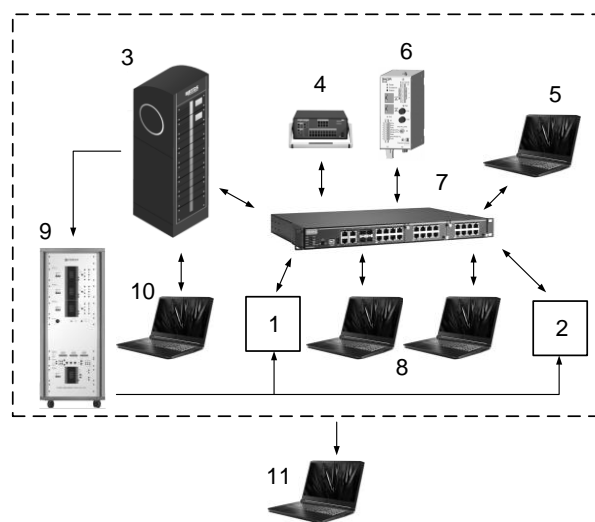


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда: 1 – УСВИ №1; 2 – УСВИ №2; 3 – комплекс для моделирования энергосистем RTDS; 4 – гибридный анализатор сигналов DANEО 400; 5 – ноутбук для управления оборудованием; 6 – устройство синхронизации единого времени СВ-04; 7 – коммутатор; 8 – ноутбуки для записи синхронизированных векторных измерений; 9 – усилители PONOVO PAC60Ci и PAV250Bi; 10 – ноутбук для управления RTDS; 11 – ноутбук с программным обеспечением MATLAB для обработки результатов экспериментов (в том числе, для вычисления места повреждения)

Основным элементом испытательного стенда является программно-аппаратный комплекс моделирования в реальном времени RTDS, с помощью которого воспроизводились осциллограммы токов и напряжений, полученные при расчете имитационной модели ЭЭС в программной среде MATLAB/Simulink. Моделирование электромагнитных переходных процессов осуществлялось в программной среде Simulink ввиду ее широкой интеграции с языком программирования MATLAB, на котором реализованы все основные и вспомогательные алгоритмы, используемые для вычисления места повреждения ВЛЭП. Использование вышеука-

занной комбинации программных средств позволяет удобно организовать итерационные вычисления, включающие получение осциллограмм, их обработку и расчет расстояния до места повреждения.

Для формирования осциллограмм использовалась имитационная модель участка ЭЭС с кольцевой сетью из трех ВЛЭП 220 кВ, адаптированная из [9]. Поясняющая схема ЭЭС представлена на рис. 2.

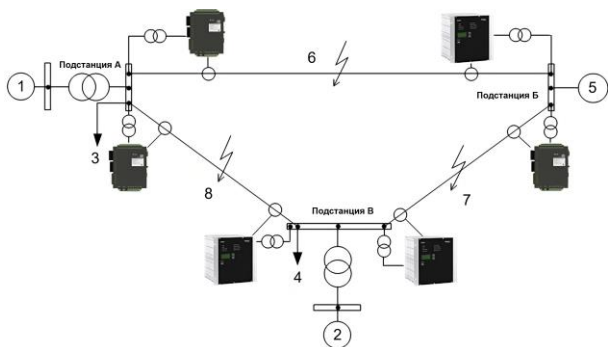


Рис. 2. Схема исследуемой ЭЭС: 1 – система №1; 2 – система №2; 3 – нагрузка на подстанции А; 4 – нагрузка подстанции В; 5 – система №3; 6 – ВЛЭП №1; 7 – ВЛЭП №2; 8 – ВЛЭП №3

В ходе испытаний поочередно на каждой из трех ВЛЭП, входящих в кольцевую сеть, устраиваются однофазные КЗ в фазе А и двухфазные КЗ на землю и без земли между фазами А и В на различном удалении от условного начала ВЛЭП (для ВЛЭП №1 – подстанция А, для ВЛЭП №2 – подстанция Б, для ВЛЭП №3 – подстанция А) через различные переходные сопротивления. Длительность КЗ составляет 6 периодов промышленной частоты. Внешний вид осциллограммы одного из КЗ показан на рис. 3 (однофазное КЗ на удалении 20 % от условного начала ВЛЭП через переходное сопротивление 1 Ом, замер тока производится со стороны подстанции А).

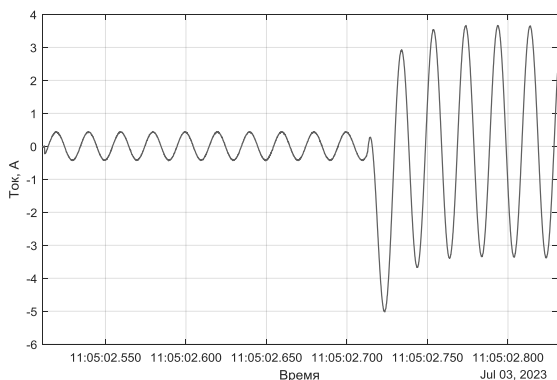


Рис. 3. Осциллограмма вторичного тока особой фазы с одной из сторон ВЛЭП

Отметим, что трансформаторы тока как отдельный объект не моделировались. Инстру-

ментальные погрешности измерения токов и напряжений вносились за счет погрешностей тракта преобразования сигналов тестового стенда и, прежде всего, за счет внутренних преобразователей тока и напряжения непосредственно в УСВИ.

Подробное описание состава экспериментов, проводимых в рамках исследования, представлено в таблице.

**Соответствие между номером эксперимента и местом КЗ (рис. 2)**

№ эксперимента	Описание КЗ
1 – 5	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
6 – 10	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
11 – 15	$K^{(1,1)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
16 – 20	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
21 – 25	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
26 – 30	$K^{(1,1)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
31 – 35	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 3 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
36 – 40	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 3 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
41 – 45	$K^{(1,1)}$ в различных точках ВЛЭП № 3 (5, 20, 50, 80, 95 % от длины линии), $R_{пер} = 1 \text{ Ом}$
46 – 47	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
48 – 49	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
50 – 51	$K^{(1,1)}$ в различных точках ВЛЭП № 1 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
52 – 53	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
54 – 55	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
56 – 57	$K^{(1,1)}$ в различных точках ВЛЭП № 2 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
58 – 59	$K^{(1)}$ в различных точках ВЛЭП № 3 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$
60 – 61	$K^{(2)}$ в различных точках ВЛЭП № 3 (5, 50 % от длины линии), $R_{пер} = 10 \text{ Ом}$

Исследование всех указанных в таблице видов повреждений осуществляется для двух вариантов комбинации цифровых фильтров УСВИ:

1) УСВИ слева (ENMU) – класс  $M^1$ , частота выдачи кадров – 100 к/с; УСВИ справа (ТПА-02) – класс  $M$ , частота выдачи кадров – 50 к/с;

2) УСВИ слева (ENMU) – класс  $P$ , частота выдачи кадров – 100 к/с; УСВИ справа (ТПА-02) – класс  $M$ , частота выдачи кадров – 50 к/с.

В качестве аварийного комплекта измерений (кадра данных СВИ, подставляемого в расчетные выражения ОМП) принимается комплект, соответствующий максимальному значению тока поврежденной фазы (фаз). В случае несовпадения частоты выдачи кадров УСВИ (frames per second, или FPS) выбор кадров данных адаптируется для УСВИ с FPS = 50. При ширине окна УСВИ класса  $M$  4–5 периодов (тогда как длительность воспроизводимых КЗ составляет 6 периодов) можно сделать вывод, что аварийный комплект, фактически соответствующий «установившемуся» режиму КЗ, доступен в каждом сценарии КЗ.

Суть разработанного алгоритма ОМП заключается в решении переопределенной системы нелинейных уравнений (т.е. нелинейной оптимизации) на основе модели ВЛЭП с распределенными параметрами, разделенной на две части местом КЗ. Система уравнений включает 27 уравнений и 19 вещественных искоемых переменных (расстояние до места повреждения, а также напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей непосредственно в точке КЗ, токи прямой, обратной и нулевой последовательностей справа и слева от точки КЗ). Для оптимизационного алгоритма задаются начальные приближения и требуемая точность, подставляются замеренные с обеих сторон токи и напряжения и далее производится оптимизация нелинейным методом наименьших квадратов (*lsqnonlin*).

Каждая из двух частей ВЛЭП может рассматриваться как однородная и описываться уравнениями длинной линии для симметричных составляющих прямой (обратной, нулевой) последовательности:

$$\dot{U}_{fm} - (\dot{U}_m \operatorname{ch}(\gamma_m \ell_1) - \dot{I}_m \underline{Z}_{Wm} \operatorname{sh}(\gamma_m \ell_1)) = 0; \quad (1)$$

$$I_{leftfm} - \left( -\dot{U}_m \frac{\operatorname{sh}(\gamma_m \ell_1)}{\underline{Z}_{Wm}} + \dot{I}_m \operatorname{ch}(\gamma_m \ell_1) \right) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{U}_m - (\dot{U}_{fm} \operatorname{ch}(\gamma_m \ell_2) - \dot{I}_{rightfm} \underline{Z}_{Wm} \operatorname{sh}(\gamma_m \ell_2)) = 0 \quad (3)$$

$$\dot{I}_m - \left( -\dot{U}_{fm} \frac{\operatorname{sh}(\gamma_m \ell_2)}{\underline{Z}_{Wm}} + \dot{I}_{rightfm} \operatorname{ch}(\gamma_m \ell_2) \right) = 0 \quad (4)$$

где  $m$  – индекс соответствующей последовательности (1, 2, 0 – прямая, обратная и нулевая составляющие соответственно);  $\dot{U}_{fm}$  – неиз-

вестное напряжение соответствующей последовательности в месте КЗ;  $\dot{I}_{leftfm}$  и  $\dot{I}_{rightfm}$  – токи соответствующей последовательности непосредственно слева и справа от места КЗ (в конце левого сегмента и начале правого сегмента ВЛЭП соответственно);  $\dot{U}_m$  и  $\dot{U}_m''$  – напряжения соответствующей последовательности в начале и конце ВЛЭП соответственно;  $\dot{I}_m$  и  $\dot{I}_m''$  – токи соответствующей последовательности в начале и конце ВЛЭП соответственно;  $\underline{Z}_{Wm}$  и  $\gamma_m$  – волновое сопротивление и постоянная распространения соответствующей последовательности;  $\ell_1$  и  $\ell_2$  – длины левой и правой частей ВЛЭП.

Для учета вида КЗ необходимо использовать соответствующие граничные условия, которые достаточно полно (с учетом переходного сопротивления) отражены в [9].

Использование в алгоритме ОМП более полной математической модели позволяет подробнее описать исследуемую ВЛЭП, что в теории способствует увеличению точности ОМП [10].

**Результаты исследования. Результаты вычислительных экспериментов для комбинации классов УСВИ  $M$ – $M$ .** Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №1 при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 4.

При КЗ на ВЛЭП № 2 погрешности во всех случаях также укладываются в регламентируемый диапазон  $\pm 1$  %. При однофазном КЗ максимального значения погрешность ОМП достигает на расстоянии 20 % от шин подстанции Б (рис. 2), при двухфазном КЗ – в середине ВЛЭП, при двухфазном КЗ на землю – также в середине ВЛЭП. По сравнению с КЗ на ВЛЭП №1, погрешности ОМП остались приблизительно на одном уровне для однофазных и двухфазных КЗ. При двухфазном КЗ на землю погрешность на ВЛЭП №2 меньше, по сравнению с ВЛЭП №1.

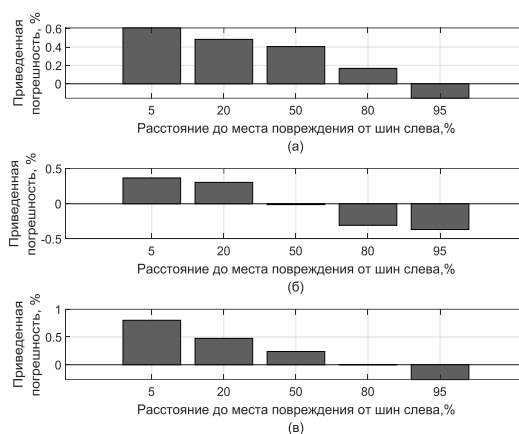


Рис. 4. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №1 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59365–2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Регламентная защита и автоматика. Система мониторинга переходных режимов. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. Дата введ. 14.04.2021. – М., 2021.

В соответствии со стандартом<sup>2</sup> организации ПАО «ФСК ЕЭС», расчетная погрешность ОМП при двустороннем замере не должна превышать 1 %.

Приведенные к длине ВЛЭП №1 погрешности ОМП укладываются в регламентируемый диапазон во всех случаях. Наибольшего значения погрешность ОМП достигает при двухфазном КЗ на землю в начале ВЛЭП, наименьшего – при двухфазном КЗ на землю на удалении 80 % от шин подстанции А (рис. 2).

Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №2 при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 5.

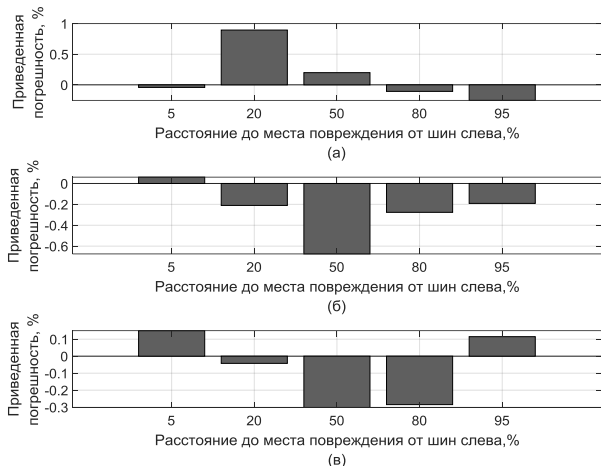


Рис. 5. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №2 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №3 при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 6.

Погрешность ОМП при КЗ на ВЛЭП №3, входящей в кольцевую сеть (рис. 2), при однофазном КЗ в фазе А не превышает 0,3 % и оказывается максимальной в ближайших к шинам подстанций точках (на удалении 5 и 95 % длины ВЛЭП). При двухфазном КЗ погрешность возрастает по мере удаления от середины ВЛЭП вплоть до шин подстанции В и достигает максимального значения 0,8 % на удалении 95 % от принятого начала ВЛЭП. При двухфазном КЗ на землю максимальное значение приведенной погрешности не превышает 0,6 % в точке на удалении 80 % от принятого начала ВЛЭП.

Приведенные погрешности ОМП для различных ВЛЭП (рис. 2) при КЗ через переходное сопротивление 10 Ом показаны на рис. 7.

Приведенная погрешность ОМП при однофазных КЗ незначительно превышает 1 % только в случае КЗ на удалении 5 % от условного начала ВЛЭП. В случае междуфазных КЗ с

землей и без нее максимальное значение приведенной погрешности ОМП составило чуть менее 3 % в середине ВЛЭП. Таким образом, погрешности ОМП при величине переходного сопротивления, равного 10 Ом, увеличились по сравнению с погрешностями при сопротивлении в 1 Ом (рис. 4–6), однако не столь существенно, и в большинстве случаев соответствуют требованиям СТО 56947007–29.120.70.241-2017.

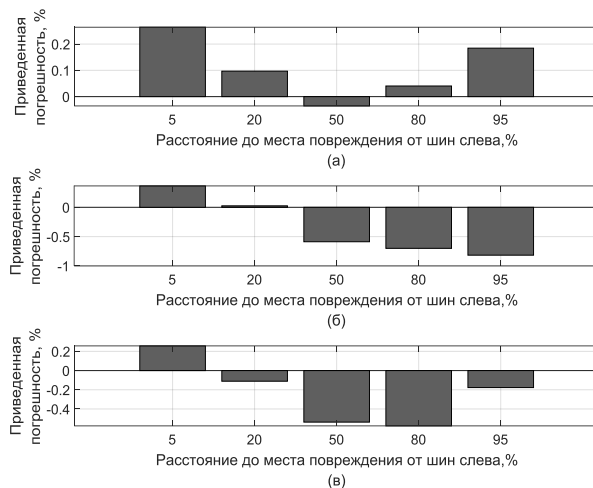


Рис. 6. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №3 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

**Результаты вычислительных экспериментов для комбинации классов УСВИ Р-М.**

Несоответствие динамических характеристик цифровых фильтров УСВИ, установленных на различных концах ВЛЭП, теоретически может негативно сказаться на величине погрешности ОМП ввиду того, что цифровой фильтр класса М является более инерционным по сравнению с фильтром УСВИ класса Р. Однако результаты анализа реальных случаев КЗ [7] свидетельствуют о том, что УСВИ класса М, как правило, успевают выполнить достаточно точную оценку векторов, описывающих аварийный режим даже при ограниченном времени существования КЗ (до 3–3,5 периодов промышленной частоты). В настоящем исследовании, как было указано выше, фильтр УСВИ класса М имеет достаточный интервал времени для выхода на «установившееся» значение оценки аварийного вектора. Таким образом, несоответствие характеристик фильтров М и Р в этом случае не должно негативно сказаться на результатах ОМП. Ниже представлены величины погрешностей ОМП, подтверждающие данный тезис.

Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №1 (рис. 2) при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 8.

<sup>2</sup> СТО 56947007–29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА.

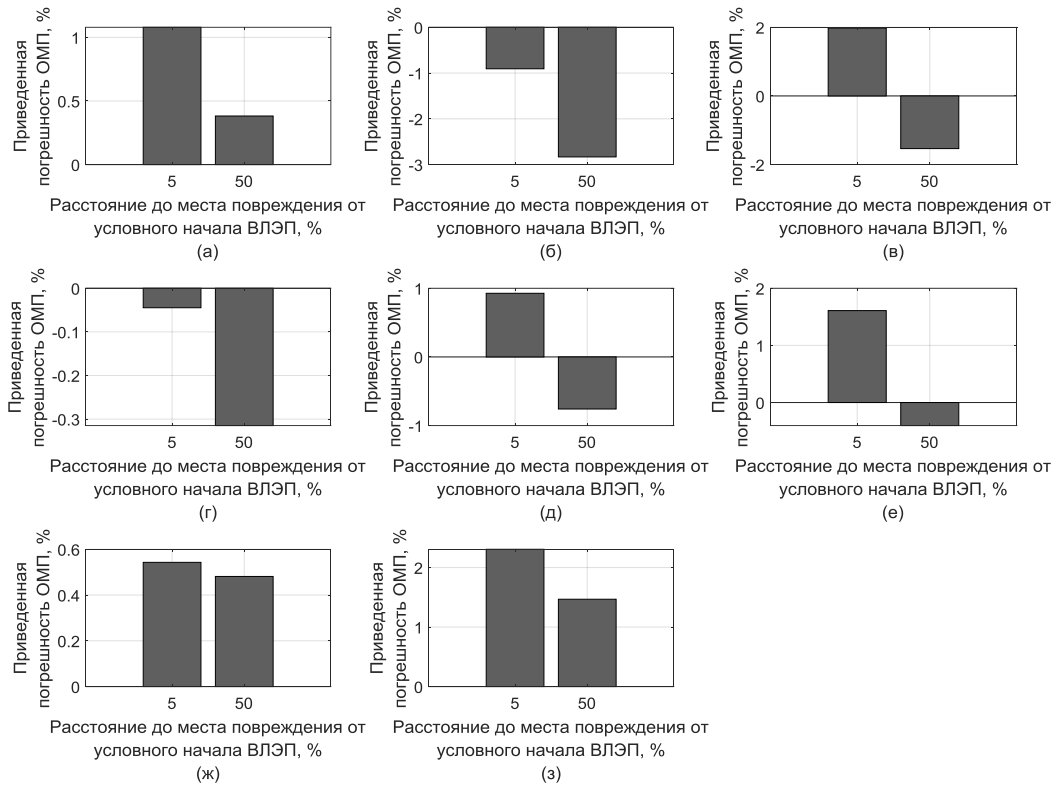


Рис. 7. Приведенные погрешности ОМП для случаев, представленных в таблице: а – 46,47; б – 48,49; в – 50,51; г – 52,53; д – 54,55; е – 56,57; ж – 58,59; з – 60,61

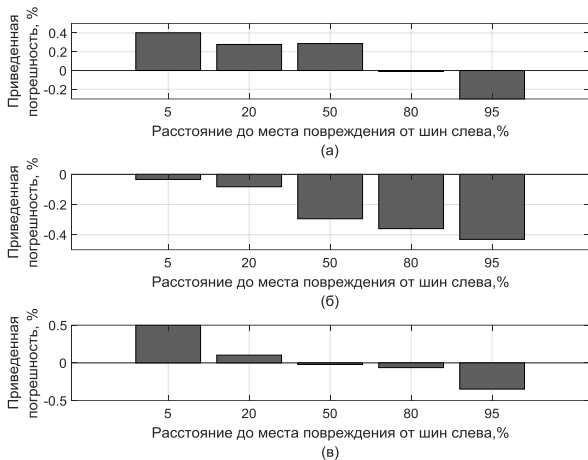


Рис. 8. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №1 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

Существенного влияния на величину погрешности ОМП установка по концам ВЛЭП УСВИ различных классов не оказала. Для всех типов КЗ погрешность ОМП в целом практически не изменилась по сравнению с комбинацией УСВИ М–М: для однофазного КЗ максимальная по модулю погрешность снизилась на 0,2 %, для двухфазного – выросла приблизительно на 0,1%, для двухфазного КЗ на землю – снизилась приблизительно на 0,25 %.

Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №2 при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 9.

Приведенные погрешности ОМП на ВЛЭП №3 при КЗ через переходное сопротивление 1 Ом показаны на рис. 10.

Приведенные погрешности ОМП для различных ВЛЭП (рис. 2) при КЗ через переходное сопротивление 10 Ом показаны на рис. 11.

Анализ результатов ОМП для сочетания цифровых фильтров УСВИ Р–М при различной частоте выдачи синхронизированных векторов (приведенных в итоге к FPS = 50) не свидетельствует о заметном росте приведенной погрешности ОМП по сравнению с комбинацией классов УСВИ М–М.

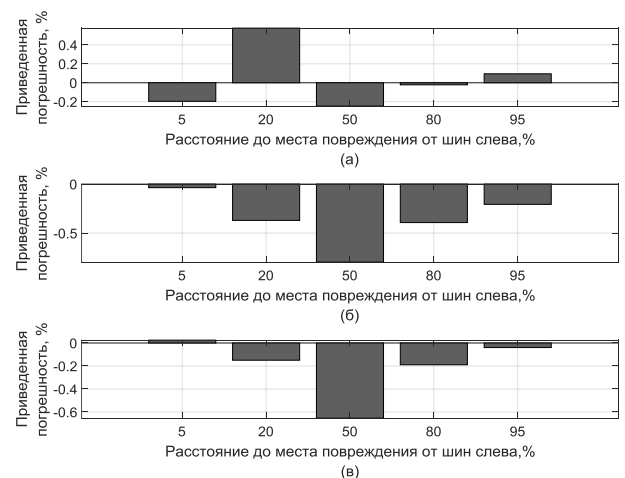


Рис. 9. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №2 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

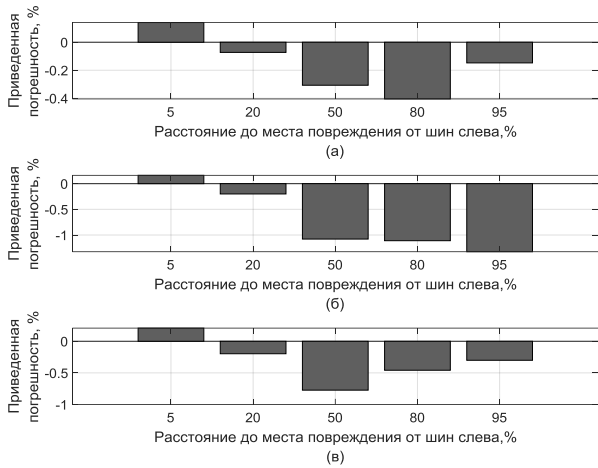


Рис. 10. Погрешности ОМП при различных КЗ на ВЛЭП №3 при переходном сопротивлении 1 Ом: а – однофазное КЗ фазы А; б – двухфазное КЗ фаз АВ; в – двухфазное КЗ на землю фаз АВ

**Выводы.** Разработанный двусторонний метод ОМП по ПАР, основанный на решении переопределенной системы нелинейных уравнений, описывающих физические процессы на ВЛЭП при КЗ, и исследование его точности, а также проведенные численные эксперименты для различных видов КЗ позволяют заключить, что в 88 % рассмотренных случаев КЗ приведенная погрешность ОМП не превышает регламентированный диапазон  $\pm 1\%$  для обеих рас-

смотренных в исследовании комбинаций УСВИ. При комбинации УСВИ М–М (т.е. конфигурировании УСВИ по классу М на обеих сторонах ВЛЭП) погрешность ОМП выходит за нормируемые значения в основном при междуфазных КЗ с землей и без земли через переходное сопротивление 10 Ом.

При комбинации УСВИ Р–М наблюдается аналогичная картина: погрешность превышает 1 % лишь при междуфазных КЗ с землей и без земли в основном через большое переходное сопротивление. Выводы справедливы для случая неучета влияния несоответствия фактических погонных параметров ВЛЭП и параметров, используемых в алгоритме ОМП в качестве паспортных. Возможные диапазоны изменения погонных параметров ВЛЭП и их влияние на величину погрешности ОМП проиллюстрированы в [11]. Проведение комплексных исследований, учитывающих совместное влияние неопределенности параметров ВЛЭП и погрешностей СВИ на точность ОМП, планируется в дальнейшем.

Можно заключить, что при достаточной длительности КЗ отличия в конфигурации УСВИ (классы М или Р, разные частоты выдачи кадров данных СВИ) не оказывают существенного влияния на величину погрешности ОМП.

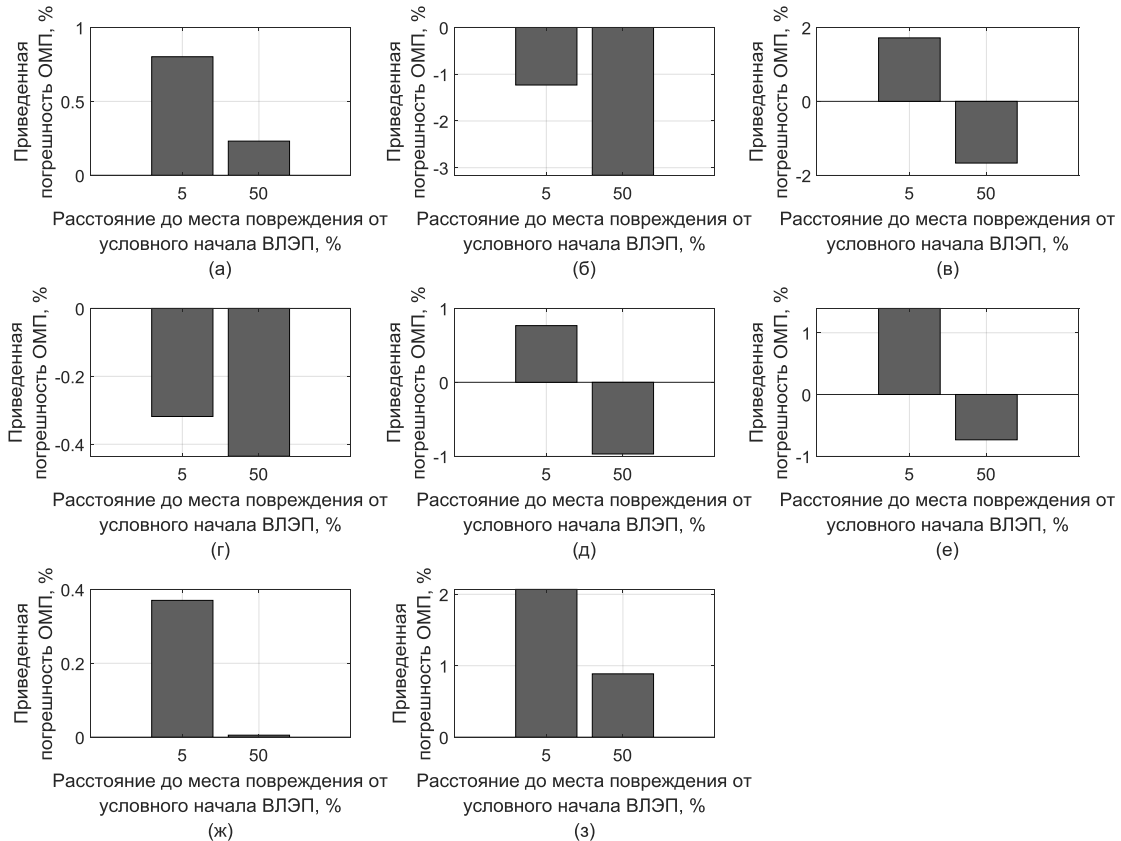


Рис. 11. Приведенные погрешности ОМП для случаев, представленных в таблице: а – 46,47; б – 48,49; в – 50,51; г – 52,53; д – 54,55; е – 56,57; ж – 58,59; з – 60,61



## Список литературы

1. **Ahmadinia M., Sadeh J.** A New PMU-Based Fault Location Scheme Considering Current Transformers Saturation // 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). – Tabriz, Iran, 2020. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEE50131.2020.9260641.
2. **Becejac T., Dehghanian P., Kezunovic M.** Impact of the Errors in the PMU Response on Synchrophasor-Based Fault Location Algorithms // 2016 North American Power Symposium (NAPS). – Denver, CO, USA, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS.2016.7747946.
3. **Al-Mohammed A.H., Abido M.A.** An adaptive fault location algorithm for power system networks based on synchrophasor measurements // Electric Power System Research. – March, 2014. – P. 153–163. DOI: 10.1016/j.epr.2013.10.013.
4. **Ankamma Rao J, Bizuayehu Bogale.** Accurate Fault Location Technique on Power Transmission Lines with use of Phasor Measurement // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – February, 2015. – P. 492–495.
5. **Brahma S.M.** New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – June, 2016. DOI: 10.1109/TDC.2006.1668609.
6. **Salehi Dobakhshari A., Ranjbar A.M.** Novel Method for Fault Location of Transmission Lines by Wide-Area Voltage Measurements Considering Measurement Errors // IEEE Trans. Smart Grid, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 874–884. DOI: 10.1109/TSG.2014.2322977.
7. **Определение** места повреждения на воздушных линиях 500 кВ ЕЭС России по данным синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, Я.А. Умнов, А.В. Жуков, Д.М. Дубинин // Энергетик. – 2023. – № 7. – С. 31–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.76.78.007>.
8. **Организация** метрологических каналов для определения мест повреждения воздушных линий на базе устройств синхронизированных векторных измерений / А.А. Яблоков, И.Е. Иванов, А.П. Тычкин и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 5–17. DOI: 10.14529/power230201.
9. **John J. Grainger, William D. Stevenson.** Power System Analysis. – New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
10. **Козлов В.Н., Бычков Ю.В., Ермаков К.И.** О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация. – Март, 2016. – № 1. – С. 42–46.
11. **Иванов И.Е., Куликов Ф.А., Мурзин А.Ю.** Метод определения места повреждения на воздушных линиях по данным СВИ с уточнением параметров линии // Релейщик. – 2021. – № 2. – С. 14–19.
12. **Иванов И.Е., Куликов Ф.А., Мурзин А.Ю.** Method of determination of the location of damage on overhead transmission lines with parameters estimation. 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Tabriz, Iran, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEE50131.2020.9260641.
13. **Becejac T., Dehghanian P., Kezunovic M.** Impact of the Errors in the PMU Response on Synchrophasor-Based Fault Location Algorithms. North American Power Symposium (NAPS). Denver, CO, USA, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS.2016.7747946.
14. **Al-Mohammed, A.H., Abido, M.A.** An adaptive fault location algorithm for power system networks based on synchrophasor measurements. Electric Power System Research, March, 2014, pp. 153–163. DOI: 10.1016/j.epr.2013.10.013.
15. **Ankamma, Rao J, Bizuayehu, Bogale.** Accurate Fault Location Technique on Power Transmission Lines with use of Phasor Measurement. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), February, 2015, pp. 492–495.
16. **Brahma, S.M.** New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, June, 2016. DOI: 10.1109/TDC.2006.1668609.
17. **Salehi Dobakhshari, A., Ranjbar, A.M.** Novel Method for Fault Location of Transmission Lines by Wide-Area Voltage Measurements Considering Measurement Errors. IEEE Trans. Smart Grid, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 874–884. DOI: 10.1109/TSG.2014.2322977.
18. **Ivanov, I.E., Umnov, Ya.A., Zhukov, A.V., Dubinin, D.M.** Opredelenie mesta povrezhdeniya na vozdushnykh liniyakh 500 kV EES Rossii po dannym sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [Fault Location on 500 kV overhead lines of Russian Federation Unified Energy System based on Synchronized Phasor Measurements]. *Energetik*, 2023, no. 7, pp. 31–39.
19. **Yablokov, A.A., Ivanov, I.E., Tyчкин, A.R., Panashchatenko, A.V., Sharygin, D.S., Kulikov, F.A.** Organizatsiya metrologicheskikh kanalov dlya opredeleniya mest povrezhdeniya vozdushnykh liniy na baze ustroystv sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [The organization of metrological channels for fault location on overhead lines based on phasor measurement units]. *Vestnik YuUrGU*, 2023, no. 2, pp. 5–17. DOI: 10.14529/power230201.
20. **Grainger, John J., Stevenson, William D.** Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
21. **Kozlov, V.N., Bychkov, Yu.V., Ermakov, K.I.** O tochnosti sovremennykh ustroystv OMP [Accuracy of modern fault location technique]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, Mart, 2016, no. 1, pp. 42–46.
22. **Ivanov, I.E., Kulikov, F.A., Murzin, A.Yu.** Metod opredeleniya mesta povrezhdeniya na vozdushnykh liniyakh po dannym SVI s utocheniem parametrov linii [PMU data-based fault location method for the overhead transmission lines with parameters estimation]. *Releishchik*, 2021, no. 2, pp. 14–19.

## References

1. Ahmadinia, M., Sadeh, J. A New PMU-Based Fault Location Scheme Considering Current Transform-