

Черемисин Василий Титович,

ФГБОУВО «Омский государственный университет путей сообщения», доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ ОмГУПС), зав. кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, адрес: г. Омск, пр. К. Маркса, 35, e-mail: cheremisinv@gmail.com

Cheremisin Vasily Titovich,

Omsk State Transport University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Director of the Research Institute of Railway Transport Energy Efficiency (NIIE OSTU), Head of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, address: Omsk, K. Marksa pr., 35, e-mail: cheremisinv@gmail.com

Третьяков Евгений Александрович,

ФГБОУВО «Омский государственный университет путей сообщения», кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, адрес: г. Омск, пр. К. Маркса, 35, e-mail: eugentr@mail.ru

Tretyakov Evgeny Aleksandrovich,

Omsk State Transport University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, address: Omsk, K. Marksa pr., 35, e-mail: eugentr@mail.ru

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ¹

А.А. ЯБЛОКОВ, Г.А. ФИЛАТОВА, А.С. ТИМОФЕЕВ, А.Е. ПЕТРОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: andrewyablokov@yandex.ru, fgala90@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существующие методы определения места повреждения на линиях электропередачи зачастую не обеспечивают требуемую точность (погрешность не более 10 % на ЛЭП длиной до 100 км) и оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов. Основной источник погрешностей устройств определения места повреждения – первичные преобразователи тока и напряжения. Использование инновационных датчиков тока и напряжения (включая катушки Роговского для физического измерения производной первичного тока) в составе цифровых измерительных трансформаторов позволяет существенно повысить точность замера электрических величин при КЗ. Целью работы является разработка функции определения места повреждения повышенной точности в составе информационной системы, учитывающей особенности нетрадиционных первичных преобразователей и в целом цифровых трансформаторов тока и напряжения.

Материалы и методы. Используются методы теории электрических цепей, а также методы математического имитационного и физико-математического моделирования. Для проведения компьютерных экспериментов использованы современные комплексы моделирования Matlab+Simulink и RSCAD, для проведения физико-математического моделирования – комплекс моделирования в режиме реального времени RTDS. При моделировании ЛЭП удельные параметры принимались известными и неизменными.

Результаты. Разработана функция определения места повреждения, отличающаяся от аналогов использованием информационных сигналов от цифровых трансформаторов тока и напряжения, обладающая устойчивостью функционирования в условиях влияния искажающих замер факторов (наличия переходного сопротивления, изменения электрической нагрузки, фазы пробоя, наличия емкости фаз на землю и др.) и погрешностью не более 8 % (при больших удаленностях и наличии переходного сопротивления в месте КЗ) или 3 % (в условиях отсутствия искажающих замер факторов). Разработан и экспериментально испытан макетный образец информационной системы с функцией определения места повреждения.

Выводы. Разработанная функция определения места повреждения позволяет повысить точность определения места КЗ и уменьшить время на поиск места повреждения. Данные информационной системы по определению места повреждения могут использоваться эксплуатационным персоналом электрических

¹ Исследование выполнено в Ивановском государственном энергетическом университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10455).

сетей. Достоверность полученных результатов определяется использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, сходимостью результатов, полученных при исследовании точности функции в различных комплексах моделирования.

Ключевые слова: цифровые трансформаторы тока и напряжения, катушка Роговского, информационная система, определение места повреждения

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE FAULT LOCATION FUNCTION FOR THE INFORMATION SYSTEM BASED ON DIGITAL TRANSFORMERS

A.A. YABLOKOV, G.A. FILATOVA, A.S. TIMOFEEV, A.E. PETROV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: andrewyablokov@yandex.ru, fgala90@mail.ru

Abstract

Background. The existing methods of fault location (FL) on power lines are often unable to provide the required accuracy and are unstable to the influence of metering-distorting factors. The main source of errors of the FL devices is the primary current and voltage transducers. Using innovative current and voltage sensors (including Rogowski coils for physical measurement of the primary current derivative) as part of digital measuring transformers allows significant improvements in the accuracy of measuring electrical values during short-circuits. The aim of the work was to develop an enhanced accuracy FL function as part of an information system (IS) that takes into account the characteristics of non-traditional primary converters and, in general, digital current and voltage transformers.

Materials and methods. The methods of the electrical circuit theory, mathematical simulation and physical-mathematical modeling are used. The computer experiments are carried out in the modern modeling systems Matlab + Simulink and RSCAD, and the physical and mathematical modeling – in the real-time modeling complex RTDS. For modeling power transmission lines, the specific parameters were assumed to be known and unchanged.

Results. The developed FL function differs from its analogs as it uses information signals from digital current and voltage transformers, is characterized by operation stability under the influence of some metering-distorting factors (presence of transient resistance, changes in electrical load, breakdown phase, presence of capacitance of phases to earth, etc.) and an error not exceeding 8 % (at large distances and in the presence of transitional resistance in short-circuit locations) or 3 % (in the absence of metering-distorting factors). A prototype of the IS with the FL function has been designed and experimentally tested.

Conclusions. The developed FL function allows increasing the accuracy of short-circuit location determination and reducing the time of finding the fault. Fault location IS data can be used by the operating personnel of electrical networks. The reliability of the obtained results is determined by the methods of the classical electrical circuit theory and the theory of electromagnetic transients in electrical power systems, and by the convergence of the results obtained in the study of the function accuracy in different modeling complexes.

Key words: digital current and voltage transformers, Rogowski coil, information system, fault location

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.063-074

Введение. В настоящее время инновационное развитие электроэнергетики направлено на создание интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (Smart Grid), которая должна обладать такими свойствами, как надежность, гибкость, обозреваемость, самодиагностика и др. [1, 2]. Использование систем распределенного контроля, осуществляющих замер электрических и при необходимости других величин во многих точках сети, а не только на шинах подстанций и электростанций, а также передающих данные о состоянии объекта по каналам связи другим устройствам,

позволит реализовать основные преимущества концепции Smart Grid, обеспечить значительно более высокую производительность электроэнергетических сетей и, как следствие, позволит генерирующим, сбытовым и коммунальным компаниям предоставлять населению энергию более высокого качества.

Концепция Smart Grid предполагает совмещение релейной защиты с информационно-измерительными функциями. Развитие микропроцессорной техники открыло возможность применения новых (нетрадиционных, маломощных) измерительных преобразователей тока и напряжения, не

использовавшихся ранее в электроэнергетике и обладающих преимуществами перед электромагнитными трансформаторами тока и напряжения. К таким преобразователям относятся катушка Роговского, магнитотранзисторный преобразователь, резистивный делитель и другие.

Инновационные преобразователи обладают высокой точностью измерения (погрешность не более 0,1 % по току и напряжению); широким частотным диапазоном измерений, в том числе возможностью измерения постоянного тока; отсутствием насыщения от токов КЗ и апериодической составляющей [3, 4].

Оцифровка сигналов нетрадиционных преобразователей тока и напряжения должна выполняться непосредственно в месте установки преобразователя в виду низкого уровня сигналов, а питание микропроцессорных устройств необходимо осуществлять от внешних систем. Нетрадиционные первичные преобразователи совместно с устройствами оцифровки и передачи сигнала получили название «цифровые трансформаторы».

Цифровые трансформаторы тока и напряжения, разработанные в Ивановском государственном энергетическом университете, являются новым оборудованием с принципиально отличающимися от традиционных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения конструктивными решениями [3, 4]. Использование нетрадиционных первичных преобразователей требует разработки новых методов и алгоритмов релейной защиты и автоматики, в том числе алгоритмов автоматического определения мест повреждений (ОМП), учитывающих особенности данных первичных преобразователей и в целом цифровых трансформаторов тока и напряжения.

Разработка автоматического ОМП по-прежнему является актуальной задачей, поскольку существующие методы ОМП зачастую не обеспечивают требуемую точность (в том числе, из-за погрешностей первичных преобразователей), оказываются неустойчивыми к влиянию искажающих замер факторов [6–10]. Актуальной задачей является разработка методов ОМП на линиях с односторонним питанием, где применяются методы одностороннего ОМП, имеющие, как правило, низкую точность и

существенную зависимость от величины переходного сопротивления².

Предлагаемое решение. Низкие массогабаритные показатели цифровых трансформаторов с нетрадиционными первичными преобразователями тока и напряжения делают возможным монтаж измерительных устройств (информационной системы (ИС) с функциями ОМП) на анкерных опорах линий электропередач (ЛЭП) без необходимости установки дополнительных монтажных конструкций (рис. 1).

ИС работает следующим образом. При помощи нетрадиционных преобразователей тока и напряжения выполняется масштабное преобразование измеряемых величин к входному значению напряжения аналого-цифрового преобразователя. Электронный блок на высоком потенциале выполняет оцифровку, обработку и передачу сигналов по оптическому кабелю на электронный блок на низком потенциале. Питание электронного блока на высоком потенциале осуществляется от тока линии при помощи питающих трансформаторов тока. Электронный блок на низком потенциале принимает потоки данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения (электронных блоков на высоком потенциале), выполняет их обработку, расчет мощности, энергии и другие показатели, формирует и отправляет их в систему сбора данных по каналу GSM или через интернет. Питание электронного блока на низком потенциале осуществляется при помощи емкостного делителя напряжения.

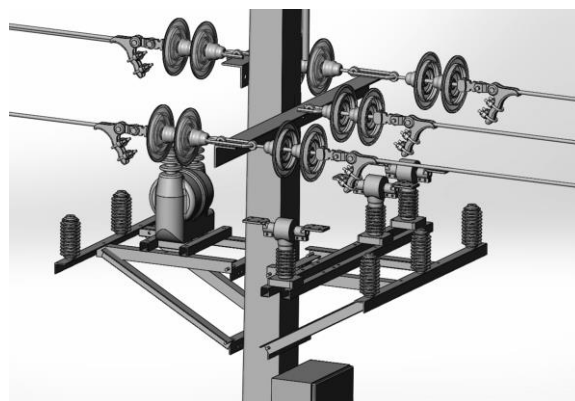


Рис. 1. Установка ИС на опоре ЛЭП

² СТО 65947007-29.240.55.224-2016. Методические указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Стандарт организации. Дата введения: 17.08.2016.

В составе ИС разработан алгоритм ОМП, осуществляющий односторонний замер расстояния до места повреждения (КЗ) по параметрам аварийного режима. Предложенная функция ОМП предполагает использование сигналов с нетрадиционных датчиков тока и напряжения, в том числе производных токов с катушек Роговского, входящих в состав цифровых трансформаторов.

Алгоритм ОМП. Разработанный алгоритм определения места повреждения основан на одностороннем замере мгновенных значений производной тока и мгновенных значений напряжения в моменты перехода тока через нулевые значения [4, 11]. Идентификация вида КЗ осуществляется по числу поврежденных фаз, токам нулевой и обратной последовательностей. По виду КЗ определяется расчетное выражение для ОМП, по которому выполняется вычисление индуктивности и расстояния l до места повреждения:

– для междуфазного КЗ (АВ или АВ0)

$$l = \frac{(u_{AB})_{i_{AB}=0}}{L_{уд1} \left(\frac{di_{AB}}{dt} \right)_{i_{AB}=0}}, \quad (1)$$

где $(u_{AB})_{i_{AB}=0}$ – разность мгновенных значений напряжений поврежденных фаз (линейное напряжение) в моменты перехода тока i_{AB} через нулевые значения;

$\left(\frac{di_{AB}}{dt} \right)_{i_{AB}=0}$ – мгновенные значения производной тока i_{AB} в моменты перехода тока i_{AB} через нулевые значения;

$L_{уд1}$ – удельная индуктивность линии (для случая междуфазного КЗ – индуктивность прямой (обратной) последовательности); l – удаленность точки КЗ;

– для КЗ на землю (А0)

$$l = \frac{(u_A)_{i_0=0}}{L_{уд} \left(\frac{di_A}{dt} \right)_{i_0=0}}, \quad (2)$$

где $(u_A)_{i_0=0}$ – мгновенные значения напряжения поврежденной фазы со стороны замера в моменты перехода тока нулевой последовательности i_0 через нулевые значения;

$\left(\frac{di_A}{dt} \right)_{i_0=0}$ – мгновенные значения производной тока поврежденной фазы в моменты перехода тока i_0 через нулевые значения;

$L_{уд} = (2L_{уд1} - L_{уд0})/3$ – удельная индуктивность линии; $L_{уд0}$ – удельная индуктивность нулевой последовательности.

индуктивность линии; $L_{уд0}$ – удельная индуктивность нулевой последовательности.

При наличии нескольких переходов тока поврежденной линии через нулевое значение расстояние до места КЗ определяется как среднее из нескольких значений l .

Измерение производной тока осуществляется при помощи катушки Роговского (одного из первичных преобразователей тока цифрового трансформатора), измерение фазного тока осуществляется безындуктивным шунтом или магнитотранзисторным преобразователем, измерение напряжения – резистивным делителем.

Разработанный алгоритм ОМП не содержит активных составляющих сопротивления (и, соответственно, падений напряжения на них) и практически не зависит от основного искажающего замер фактора – переходного сопротивления в месте КЗ.

Методы исследования. Учитывая ограниченные возможности проведения экспериментов в действующих электроустановках и физического моделирования, а также в связи с созданием эффективных универсальных систем математического моделирования (например, MATLAB с пакетом расширения SIMULINK и RSCAD) наиболее мощным средством количественного анализа переходных процессов при КЗ в электрических сетях является имитационное моделирование на ЭВМ, применение которого, однако, ограничено бесконечным числом расчетных вариантов, соответствующих конкретным сочетаниям влияющих факторов.

При исследовании метода ОМП искажающие замер факторы принимались независимыми друг от друга. Изменения значений искажающих замер факторов принимались из доступных источников (например, справочников по проектированию электрических сетей) или требований к устройствам ОМП (например, обеспечения точности при переходных сопротивлениях до 50 Ом). Для исследования большого числа факторов или большого числа точек замера использовался автоматизированный алгоритм моделирования.

Для исследования макетного образца ИС с функцией ОМП использовался метод физико-математического моделирования. Имитационное моделирование переходных процессов осуществлялось в

среде RSCAD. Мгновенные значения электрических величин по протоколу МЭК-61850 подавались на макет в режиме реального времени с комплекса RTDS.

Методика проведения исследований алгоритма ОМП на компьютерных моделях (для программы испытаний 1). Для исследования переходных процессов при повреждениях (КЗ) в программном продукте Simulink были разработаны модели электрических сетей 110–330 кВ с односторонним питанием: упрощенные и комплексные, соответствующие реальным схемам электроснабжения [11].

Отдельные искажающие замер факторы исследовались на упрощенной модели сети 110 кВ с односторонним питанием. Линия электропередачи представлялась блоком с распределенными параметрами. Внешний вид модели представлен на рис. 2 снизу.

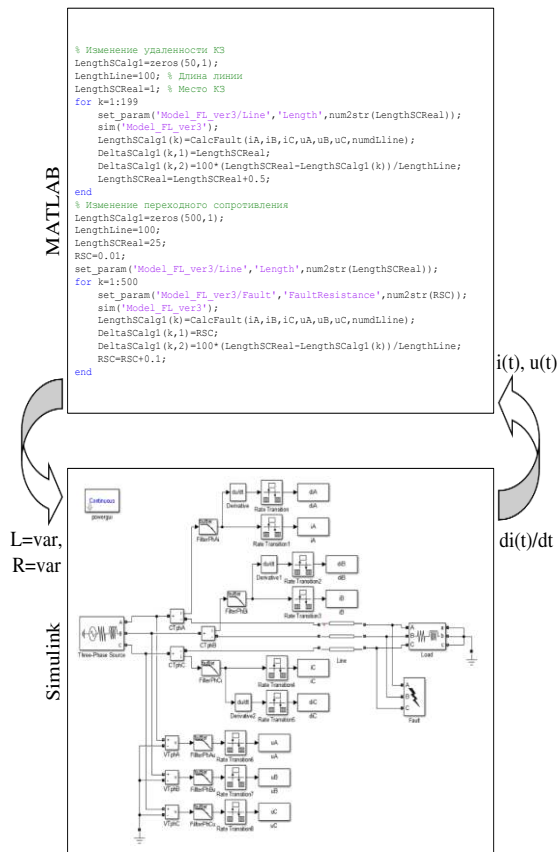


Рис. 2. Программа в Matlab (вверху) и внешний вид модели в Simulink (внизу) для проверки работы алгоритма ОМП по программе 1

Результатом моделирования переходных процессов являются временные зависимости (осциллограммы) электрических величин, зарегистрированные с моделей первичных преобразователей

(безындуктивного шунта, катушки Роговского, резистивного делителя), установленных в точке замера (месте установки ИС). Полученные зависимости переходных фазных напряжений, фазных токов и их производных могут быть импортированы в виде массивов мгновенных значений в рабочее пространство MATLAB, где производится их обработка в соответствии с исследуемым алгоритмом.

Для оценки работоспособности и точности разработанного алгоритма определения места повреждения требуется вариация различных искажающих замер факторов и значительного количества их характеристик. Автоматизированный расчет с «ручным» запуском каждого вычислительного эксперимента (включая запуск расчета в Simulink, запуск расчета в MATLAB, изменение параметров модели и т.д.) не позволяет проводить более 20 экспериментов за час при значительных трудозатратах. В связи с указанным была разработана программа в MATLAB, выполняющая серию вычислительных экспериментов без участия исследователя (рис. 2).

Исследователь задает диапазон изменения искажающего замер фактора (например, переходного сопротивления в месте замыкания), а также дискретность его изменения. Программа в MATLAB работает следующим образом: при помощи специализированных функций программа выполняет задание параметров модели в Simulink, запускает расчет модели, получает мгновенные значения тока, производной тока и напряжения, выполняет их обработку согласно исследуемому алгоритму определения места повреждения, записывает результаты расчетов в массив и повторяет указанную последовательность действий для следующего набора параметров.

Результатом работы алгоритма является вычисленная погрешность ОМП при каждом значении искажающего замер фактора (например, удаленности КЗ (рис. 3)). В данном эксперименте повреждения (однофазные металлические КЗ) моделировались через каждые 0,5 км. Полученная зависимость погрешности ОМП от расстояния до места КЗ аппроксимировалась полиномом 2 порядка. Далее на рис. 4–10 представлены только аппроксимирующие кривые.

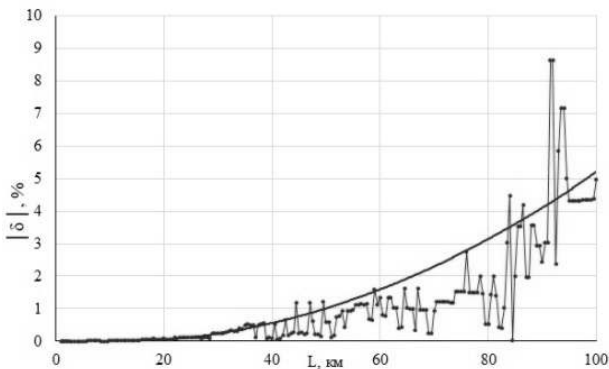


Рис. 3. Зависимость погрешности алгоритма ОМП от удаленности КЗ при использовании ненасыщаемого датчика тока с последующим дифференцированием: маркерами обозначены погрешности в точках замера; кривой – аппроксимация полиномом 2-го порядка

Программа испытаний 1. Исследование алгоритма ОМП на имитационных моделях. Исследования были проведены для нескольких типов первичных преобразователей тока (их моделей) и соответствующих вариантов реализаций алгоритма ОМП с односторонним замером на базе дифференциального уравнения линии (рис. 4):

1. Первичный преобразователь тока – электромагнитный трансформатор, производная тока вычисляется математически.

2. Ненасыщающийся первичный преобразователь тока (магнитотранзисторный преобразователь, оптический трансформатор, катушка Роговского с интегрированием сигнала и др.), производная тока вычисляется математически.

3. Первичный преобразователь тока – катушка Роговского без интегрирования сигнала. Для определения моментов перехода тока через ноль используются сигналы с безындуктивного шунта.

В разработанной программе были выполнены следующие исследования работы алгоритмов определения мест повреждения:

– действия избирателя поврежденных фаз при различных видах КЗ;

– расчет индуктивности (расстояния) до места повреждения по мгновенным значениям выборок измеряемых электрических величин;

– оценка точности алгоритма в условиях влияния искажающих замер факторов.

Для всех видов КЗ поврежденные фазы определялись верно, в том числе и при КЗ через переходное сопротивление.

При оценке точности алгоритма относительная погрешность функции ОМП δ , %, определялась по формуле

$$\delta = \frac{L_3 - L_{\text{КЗ ист}}}{L_{\text{Л}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где L_3 – замеренное (расчетное) расстояние до места повреждения, км; $L_{\text{КЗ ист}}$ – истинное значение удаленности КЗ, км; $L_{\text{Л}}$ – длина ЛЭП.

Результаты исследования точности алгоритма в зависимости от изменения искажающих замер факторов представлены на рис. 4–8, в том числе при использовании различных типов первичных датчиков тока (рис. 4).

Результаты исследований вышеуказанных вариантов организации системы ОМП (рис. 4) показывают, что при физическом получении производной тока с катушки Роговского погрешность расчета расстояния до места повреждения будет наименьшей (рис. 4, кривая 1). При этом следует отметить, что приведенная оценка погрешности алгоритма ОМП, использующего мгновенные значения тока от электромагнитного трансформатора (рис. 4, кривая 3), выполнена при небольшом насыщении магнитопровода трансформатора (малые значения аperiodической составляющей). При глубоком насыщении магнитопровода трансформатора и, соответственно, искажении формы кривой тока, что обуславливает погрешность определения моментов перехода тока через ноль и значений производной тока, погрешность ОМП составляет более 50 %.

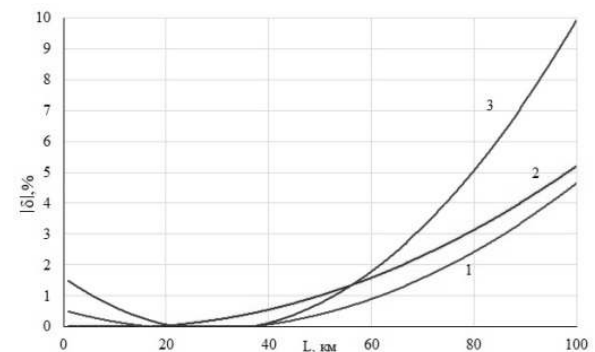


Рис. 4. Зависимость погрешности ОМП от удаленности КЗ при использовании в качестве первичных датчиков тока: 1 – катушки Роговского для получения производной тока и безындуктивного шунта; 2 – ненасыщаемого датчика тока с последующим дифференцированием; 3 – электромагнитного ТТ с последующим дифференцированием

Погрешность функции ОМП при использовании катушки Роговского (без интегрирования сигнала для определения производной тока КЗ) и ненасыщаемого датчика тока (для определения моментов перехода тока через нулевые значения) была наименьшей и при исследовании влияния других искажающих замер факторов, поэтому далее на рис. 5–10 показаны результаты исследований погрешностей только указанного варианта реализации функции.

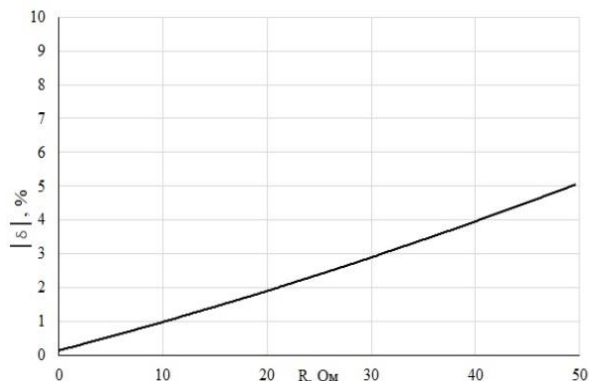


Рис. 5. Зависимость погрешности алгоритма ОМП от переходного сопротивления (для КЗ А0) при использовании замера с катушки Роговского и удаленности КЗ 20 км

На рис. 5–8 представлены зависимости погрешностей функции ОМП при изменяющихся значениях переходного сопротивления, фазы пробоя и электрической нагрузки на примере расчета расстояния до места однофазного КЗ А0.

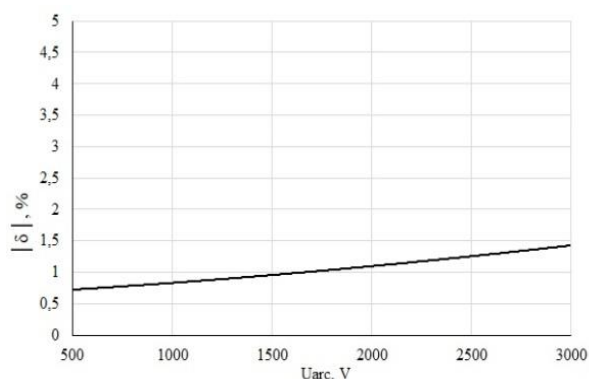


Рис. 6. Зависимость погрешности алгоритма ОМП от падения напряжения на дуге в месте КЗ (для КЗ А0) при использовании замера с катушки Роговского и удаленности КЗ 20 км

Переходное сопротивление (рис. 5, 6) моделировалось двумя способами – активным сопротивлением в месте повре-

ждения (до 50 Ом [9]) и дугой, представленной двумя противо-ЭДС (U_{arc}). При изменениях переходного сопротивления погрешность алгоритма не превышает 7 и 2 % в зависимости от модели переходного сопротивления.

Фаза напряжения на поврежденной фазе, изменение нагрузки и наличие емкостей фаз на землю не оказывают значительного влияния на точность измерения (рис. 7, 8). На рис. 7 нагрузка показана в процентах от нагрузки данной линии в нормальном режиме. При нагрузке в 200 % от номинальной погрешность также не превышала 1 % для данной удаленности КЗ.

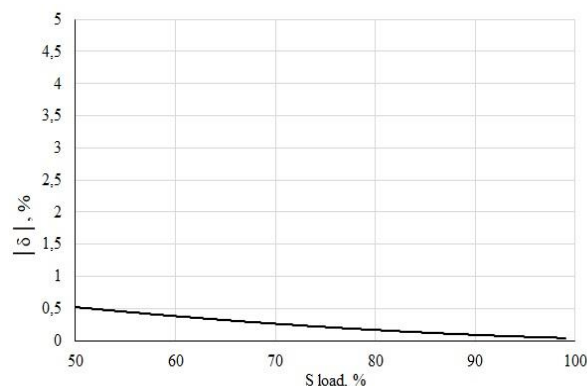


Рис. 7. Зависимость погрешности алгоритма ОМП от изменения нагрузки (для КЗ А0) при использовании замера с катушки Роговского и удаленности КЗ 20 км

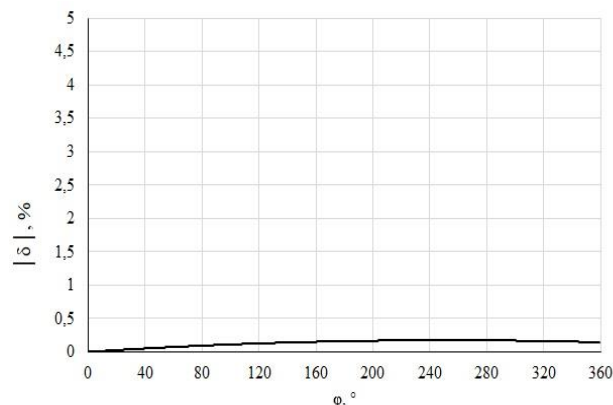


Рис. 8. Зависимость погрешности алгоритма ОМП от фазы пробоя (для КЗ А0) при использовании замера с катушки Роговского и удаленности КЗ 20 км

Для иллюстрации работы алгоритма также представлены 3D графики зависимостей погрешностей ОМП от основных факторов – переходного сопротивления (моделировалось активным сопротивлением) и удаленности КЗ

(рис. 9, 10) для однофазных и междуфазных КЗ.

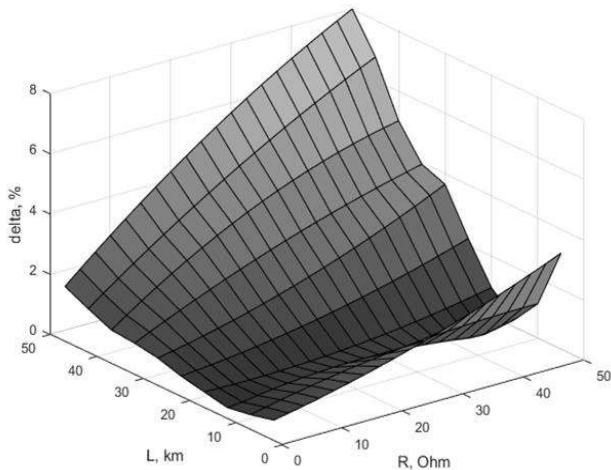


Рис. 9. Зависимость погрешности ОМП от переходного сопротивления при различных удаленностях КЗ для однофазных КЗ

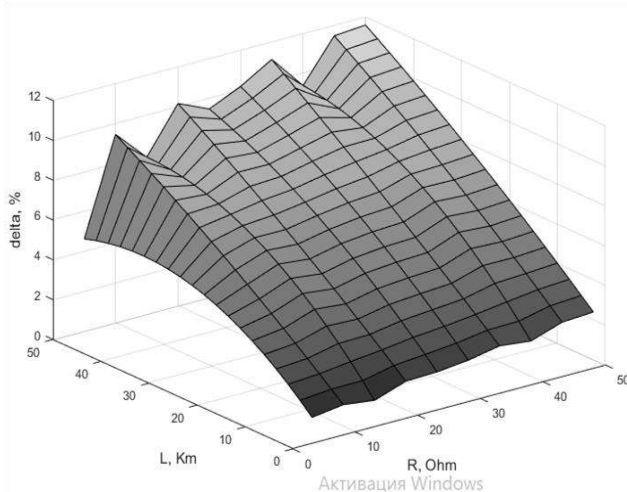


Рис. 10. Зависимость погрешности ОМП от переходного сопротивления при различных удаленностях КЗ для двухфазных КЗ

Экспериментальное исследование алгоритма ОМП в составе макета ИС. На основе указанных расчетных выражений реализована функция ОМП в составе макетного образца ИС. ИС, кроме указанных первичных преобразователей, содержит микропроцессорное устройство управления.

Устройство управления ИС может работать с любыми цифровыми устройствами и преобразователями, поддерживающими МЭК-61850. Для цифровой фильтрации сигналов используется антиалайзинговый фильтр с частотой среза 32000 Гц, не влияющий на точность ОМП [4, 10].

Программа испытаний 2. Испытания ИС при выдаче сигнала с Ретом-61850. Была проведена оценка работы функции ОМП в составе устройства управления ИС при моделировании переходных процессов в Simulink на моделях электрических сетей, сохранении осциллограмм первичных сигналов в формате Comtrade и воспроизведении осциллограмм в виде SV-потока устройством Ретом-61850 (рис. 11).

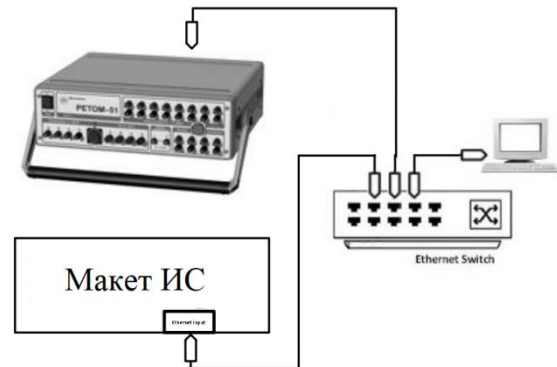


Рис. 11. Схема проведения эксперимента по программе испытаний 2

Программа испытаний была аналогична предыдущему пункту – искажающие замер факторы принимались независимыми друг от друга, диапазон их изменения соответствовал программе испытаний 1. В виду достаточной трудоемкости процесса (необходимости симуляции переходного процесса в Simulink для каждого значения параметра или искажающего замер фактора и сохранения осциллограмм в формате Comtrade для последующего воспроизведения Ретом-61850) и невозможности выдать сигнал в виде SV-потока непосредственно с модели сети на устройство ИС значения погрешности рассчитывались для меньшего числа точек КЗ (5–10 значений для каждого фактора).

Погрешности при программе испытаний в условиях влияния искажающих замер факторов не превысили 8 % (табл. 1– 6) и в целом соотносились с результатами испытаний, полученными выше.

Таблица 1. Погрешность ОМП при различных удаленностях КЗ (для А0)

$L_{КЗ},$ км	10	20	40	60	80	100
$\delta, \%$	-0,51	0,37	1,66	-1,66	3,28	7,77

Таблица 2. Погрешность ОМП при различных удаленностях КЗ (для АВ)

$L_{КЗ}$, км	10	20	40	60	80	100
δ , %	1,74	-0,31	-0,12	-1,2	-1,84	0,05

Таблица 3. Погрешность ОМП при наличии переходного сопротивления КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

R_F , Ом	1	10	20	30	40	50
δ , %	0,44	1,27	2,13	2,63	3,59	4,38

Таблица 4. Погрешность ОМП при наличии электрической дуги КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

$E_{Д}$, В	500	1000	1500	2000	2500	3000
δ , %	0,4	0,52	0,6	0,71	0,84	0,96

Таблица 5. Погрешность ОМП при различной величине эл. нагрузки КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

$Z_{НАГР}$, % от номинальн.	50	60	70	80	90	100
δ , %	0,18	0,66	0,59	0,66	0,49	0,37

Таблица 6. Погрешность ОМП при различных углах пробоя при КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

φ , °	0	40	80	120	200	280	360
δ , %	0,37	0,05	0,17	-0,04	0,29	0,16	0,37

Программа испытаний 3. Испытания ИС при выдаче сигнала с RTDS. Была проведена оценка работы функции ОМП при моделировании переходных процессов в среде RSCAD и выдаче SV-потока первичных сигналов с платы GTNETx2-SV-v6 комплекса моделирования RTDS непосредственно в режиме реального времени (рис. 12). Программа испытаний была аналогична указанной в предыдущем пункте. Конфигурации сети и ее параметры соответствовали моделям в Simulink.

При моделировании переходных процессов в RSCAD и подаче сигналов первичных величин непосредственно на ИС погрешности функции ОМП получились сопоставимыми с погрешностями, полученными в предыдущих опытах.

Точность ОМП не зависит от величины переходного сопротивления, величины электрической нагрузки и угла пробоя. При изменении указанных факторов

для одного значения удаленности КЗ погрешность не превышала 1–2 %. Наибольшее влияние на точность ОМП оказывает удаленность КЗ. При удаленности 100 км от точки замера погрешность может составить 8 % (табл. 7–10).

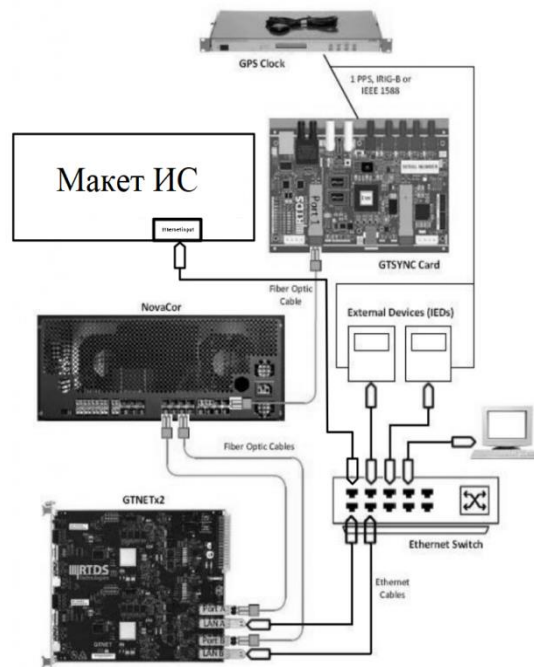


Рис. 12. Схема проведения эксперимента по программе 3

Таблица 7. Погрешность ОМП при различных удаленностях КЗ (для А0)

$L_{КЗ}$, км	20	40	60	80	100
δ , %	-0,46	-1,43	-3,15	-5,34	-8,63

Таблица 8. Погрешность ОМП при различных удаленностях КЗ (для АВ)

$L_{КЗ}$, км	20	40	60	80	100
δ , %	-0,06	0,04	0,08	0,25	0,47

Таблица 9. Погрешность ОМП при наличии переходного сопротивления КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

R_F , Ом	1	10	20	30	40	50
δ , %	-0,41	0,37	1,03	1,88	0,23	0,38

Таблица 10. Погрешность ОМП при различной величине эл. нагрузки КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

$Z_{НАГР}$, % от ном.	50	60	70	80	90	100
δ , %	-0,86	-0,7	-0,6	-1,08	-0,5	-0,48

Таблица 11. Погрешность ОМП при различных углах прооя при КЗ А-0 (для удаленности 20 км)

$\varphi, ^\circ$	0	40	80	120	200	280	360
$\delta, \%$	-0,5	-0,9	-0,8	0,1	-0,5	0,3	0,2

При проведении автоматизированного эксперимента (по факторам удаленности и наличия переходного сопротивления) для получения большего числа точек расчетная погрешность составила не более 8–10 % (рис. 13, 14).

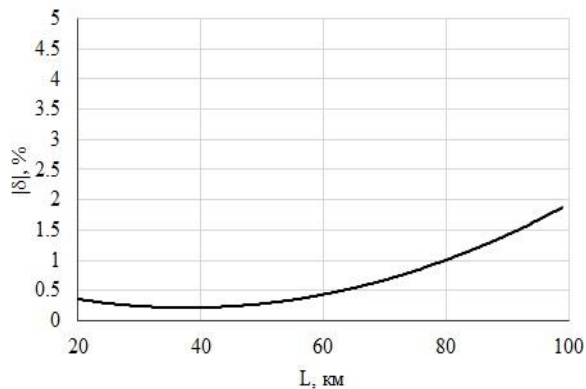


Рис. 13. Зависимость погрешности функции ОМП от удаленности КЗ для однофазного КЗ

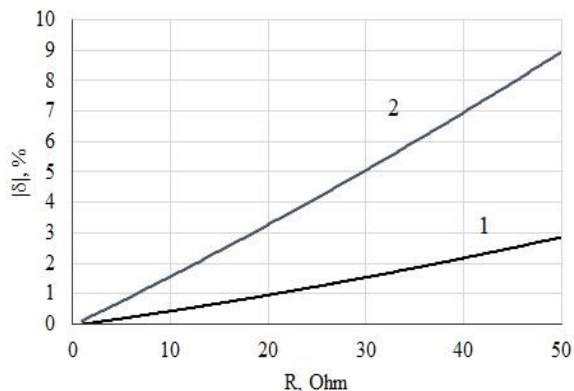


Рис. 14. Зависимость погрешности функции ОМП от переходного сопротивления в месте КЗ (для КЗ А0) и удаленности КЗ: 1 – 20 км; 2 – 70 км

Оценка результатов и сравнение погрешностей ОМП с аналогами. Была проведена оценка работы других устройств (функций) ОМП отечественного производства, в том числе работающих по протоколу МЭК-61850.

Первое устройство (с шиной процесса) содержит функцию ОМП одностороннего замера. При подаче Comtrade-осциллограмм в виде SV-потока (по программе 2) были получены погрешности ОМП не более 10 %. В целом результаты расчета были сопоставимыми с полученными по программе

испытаний 2. Средняя погрешность составила 3 %. Однако при больших переходных сопротивлениях (50 Ом) расстояние определено не было, несмотря на дополнительные настройки пускового органа.

Второе устройство является отдельным устройством одностороннего или (при наличии канала связи) двустороннего замера. При проверке устройства Comtrade-осциллограммы (по программе 2) воспроизводились поверочным устройством Omicron-356 СМС. При подаче токов и напряжений на устройство были получены погрешности ОМП не более 10 %. Однако при удаленности КЗ 10 км расстояние определено не было.

Выводы. Предложенная функция одностороннего ОМП по параметрам аварийного режима обладает устойчивостью функционирования в условиях влияния искажающих замер факторов и погрешностью не более 8 % при больших удаленностях и наличии переходного сопротивления в месте КЗ и 3 % в условиях отсутствия искажающих замер факторов. Функция реализована в составе макетного образца ИС на основе цифровых измерительных трансформаторов. Использование инновационных первичных преобразователей (в том числе, катушек Роговского) позволяет исключить погрешности ОМП, вызванные насыщением датчиков тока.

Список литературы

1. **What** is the digital substation and what makes it digital? Edvard Csanyi. Electrical Engineering Portal <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation>
2. **Richards S., Pavaiya N., Boucherit M., Ferret P., Diemer P.** Denmark Digital Substations: Feedback on Site Experience https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html
3. **Lebedev V.D., Yablokov A.A.** Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177. – P. 012099.
4. **Кувшинов Г.Е.** Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматизации // РТА. – 2012. – 316 с.
5. **Yablokov A., Filatova G., Timofeev A.** Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location // Proc. of MATEC Web Conf. – 2017. – Vol. 141. – P. 1–5.

6. Куликов А.Л., Обалин М.Д. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин // Вестник ИГЭУ. – 2016. – № 5. – С.16–21.

7. Kalam A., Stojcevski B. Fault Location in Overhead Power Lines Using the IEC61850 International Protocol // International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.). – 2010. – Vol. 3, no. 5.

8. Kachesov V.E., Lavrov V.Yu., Cherepanov A.B. Parametric method of fault location in distribution networks // Power Technology and Engineering. – 2003. – Vol. 37, no. 4. – P. 262–268.

9. Бычков Ю.В., Козлов В.Н., Ермаков К.И. О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1. – С. 42–46.

10. Horak J., Hrabliuk J. Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs http://idconline.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. Яблоков А.А., Тимофеев А.С., Филатова Г.А. Разработка алгоритма дистанционного определения места повреждения на основе данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XL науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудования». – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. – С. 443–447.

References

1. What is the digital substation and what makes it digital? Edvard Csanyi. Electrical Engineering Portal <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation>

2. Richards, S., Pavaiya, N., Boucherit, M., Ferret, P., Diemer, P. Denmark Digital Substations: Feedback on Site Experience https://www.pacw.org/issue/june_2014_issue/lessons_learned/digital_substations_feedback_on_site_experience/complete_article/1.html

3. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A. Studies in electromagnetic compatibility of optical and digital current and voltage transformers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, pp. 012099.

4. Kuvshinov, G.E. Sovremennye napravleniya razvitiya izmeritel'nykh preobrazovateley toka dlya releynoy zashchity i avtomatiki [Modern development directions of measuring current converters for relay protection and automation]. *RTA*, 2012. 316 p.

5. Yablokov, A., Filatova, G., Timofeev, A. Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location. *Proc. of MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 141, pp. 1–5.

6. Kulikov, A.L., Obalin, M.D. Opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi po mgnovennym znacheniyam ostsillogramm avariynykh sobytiiy [Fault location based on measuring the instantaneous value from the emergency events oscillogram]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 16–21.

7. Kalam, A., Stojcevski, B. Fault Location in Overhead Power Lines Using the IEC61850 International Protocol. *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, 2010, vol. 3, no. 5.

8. Kachesov, V.E., Lavrov, V.Yu., Cherepanov, A.B. Parametric method of fault location in distribution networks. *Power Technology and Engineering*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 262–268.

9. Bychkov, Yu.V., Kozlov, V.N., Ermakov, K.I. O tochnosti sovremennykh ustroystv OMP [On the accuracy of modern fault location devices]. *Releytnaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2016, no. 1, pp. 42–46.

10. Horak, J., Hrabliuk, J. Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. Yablokov, A.A., Timofeev, A.C., Filatova, G.A. Razrabotka algoritma distantsionnogo opredeleniya mesta povrezhdeniya na osnove dannykh ot tsifrovyykh transformatorov toka i napryazheniya [Development of the remote fault location algorithm based on the data from digital current and voltage transformers]. *Sbornik materialov XL nauchnogo seminara po tematike «Diagnostika energooborudovaniya»: «Kibernetika energeticheskikh system»* [Proceedings of the XL scientific seminar on «Power Equipment Diagnostics»: Cybernetics of Power Systems]. Novocherkassk: YuRGPU(NPI), 2018, pp. 443–447.

Яблоков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: andreyablokov@yandex.ru

Yablokov Andrei Anatolyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power Systems Automatic Control Department, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

Филатова Галина Андреевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: fgala90@mail.ru

Filatova Galina Andreyevna,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power Systems Automatic Control Department, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: fgala90@mail.ru

Тимофеев Александр Сергеевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер-проектировщик, e-mail: 79303491009@yandex.ru

Timofeev Aleksandr Sergeevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Design-Engineer, e-mail: 79303491009@yandex.ru

Петров Алексей Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: usetheforcealex@yandex.ru

Petrov Aleksei Evgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Student of the Electric Power Systems Automatic Control Department, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: usetheforcealex@yandex.ru