

УДК 621.3

Определение статистических свойств случайной ошибки, сопровождающей синхронизированные векторные измерения токов и напряжений в установившемся режиме

И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: iivanov@mtu.edu

Авторское резюме

Состояние вопроса: Синхронизированные векторные измерения токов и напряжений сопровождаются систематическими и случайными ошибками. В настоящее время не существует методики, позволяющей определить статистические свойства кумулятивной случайной ошибки измерений, включающей погрешности самого устройства векторных измерений, погрешности трансформаторов тока и напряжения, и другие ошибки, сопровождающие измерения.

Материалы и методы: При разработке алгоритма использованы методы математического анализа, а также законы теории вероятностей. В качестве метода исследования при выполнении экспериментальной части использовано математическое моделирование с применением программного обеспечения MATLAB. Исходными данными являлись массивы комплексных значений токов и напряжений, полученные от устройств синхронизированных векторных измерений.

Результаты: Обоснован характер вероятностного распределения случайной ошибки синхронизированных векторных измерений. Предложена и верифицирована методика оценки среднеквадратического отклонения случайной ошибки измерений при обработке большого массива реальных данных. Выявлены различия в погрешностях векторных измерений, выполняемых цифровым регистратором аварийных повреждений и устройством защиты и автоматики.

Выводы: Разработанный алгоритм позволяет получить реальные числовые данные об ошибке векторных измерений, что является актуальным при тестировании других алгоритмов, использующих синхронизированные замеры векторов тока и напряжения, например алгоритмов идентификации актуальных параметров линий электропередачи. Реализация алгоритма в программном обеспечении MATLAB максимально автоматизирует процесс обработки исходных синхронизированных векторных измерений.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, систематическая ошибка, случайная ошибка, нормальный закон распределения, равномерное распределение, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, дисперсия, центральная предельная теорема, ошибка квантования, целые числа, числа с плавающей точкой, идентификация актуальных параметров линий электропередачи, цифровой регистратор аварийных повреждений.

Identification of statistical properties of random errors accompanying steady state synchronized current and voltage phasor measurements

I.E. Ivanov, A.Yu. Murzin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: iivanov@mtu.edu

Abstract

Background: Synchronized current and voltage phasor measurements contain both systematic and random errors. There has been no technique aimed at the identification of statistical properties of a cumulative random error coming with synchronized phasor measurements that can be seen as a result of phasor measurement unit errors and other uncertainties such as current and voltage transformer errors.

Materials and methods: The developed algorithm is based on some common mathematical analysis methods as well as probability theory definitions and theorems. Numerical results have been obtained by means of mathematical modeling with MATLAB as the software tool for simulations. A large set of current and voltage phasors sourced from phasor measurement units has been used as input data for the analysis.

Results: We have identified the probability distribution of a random error accompanying phasor measurements. An algorithm has been developed and verified that makes it possible to estimate the random error standard deviation when dealing with a large amount of data. The study also revealed a difference in the precision of phasor measurements made by digital fault recorders and relays.

Conclusions: The developed technique allows getting numerical data that show what the phasor measurement random error is like. This is important for the verification of various algorithms utilizing synchronized current and voltage phasor measurements, e.g. those aimed at the line parameter estimation in real time. The associated scripts implemented in MATLAB make data processing faster and more convenient.

Key words: synchronized phasor measurements, systematic error, random error, normal distribution, uniform distribution, mean, standard deviation, variance, central limit theorem, quantization error, integers, floating point numbers, real-time transmission line parameter estimation, digital fault recorder.

Введение. Синхронизированные векторные измерения (СВИ) токов и напряжений, являясь одним из ключевых элементов концепции Smart Grid, приобретают все большее распространение в электроэнергетических системах по всему миру [1]. Устройство СВИ (англоязычный термин – PMU, или Phasor Measurement Unit) вычисляет комплексные значения (вектора) вторичных токов и напряжений, синхронизированные с подобными измерениями в других частях энергосистемы благодаря приему сигнала точного времени от системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System). Концепция СВИ подробно описана в [2]. В Северной Америке в эксплуатации находится уже несколько сотен устройств СВИ [1], а к концу 2014 года их число должно увеличиться до 1000 [3]. ОАО «ФСК ЕЭС» также занимается разработкой и внедрением устройств СВИ [4]. Технология СВИ может быть применена для оценки режимных параметров энергосистемы, а также мониторинга состояния ее отдельных элементов, выполнения адаптивной защиты, своевременного выявления и смягчения последствий лавины напряжения и др. [2, 5, 6].

В связи со все большим распространением и перспективностью применения устройств СВИ возникает задача оценки точности векторных измерений в реальных условиях эксплуатации. При разработке, тестировании и практической реализации некоторых алгоритмов, использующих технологию СВИ, ошибка измерений играет существенную роль, поэтому актуальным представляется выяснение ее реального «порогового» значения. К подобным алгоритмам относится, например, определение действительных параметров воздушных линий электропередачи [6, 7].

Действующая редакция международного стандарта¹ обозначает лишь погрешность, связанную с обработкой данных непосредственно самим устройством СВИ, включая неточности синхронизации. Эта погрешность в установленном режиме регламентирована на уровне не более 1%. Однако входные сигналы – вторичные токи и напряжения – уже содержат погрешности, в первую очередь вследствие неидеальности трансформаторов тока и напряжения. Поэтому при тестировании алгоритмов [6, 7] необходимо учитывать совокупную погрешность всей системы сбора аналоговых сигналов и вычисления их комплексных значений.

Наконец, можно выделить систематические и несистематические, или случайные, ошибки векторных измерений. Если первые могут быть учтены в алгоритме, описанном в [7], как дополнительные неизвестные, то вторые могут быть отфильтрованы только на основании их статистических свойств.

Исходя из сказанного, целью нашего исследования является определение статистических свойств совокупной случайной ошибки синхронизированных векторных измерений в установленном режиме работы. Основными решаемыми задачами являются выяснение статистического распределения случайной ошибки, а также разработка, верификация и применение к имеющимся массивам измерений алгоритма, позволяющего оценить среднеквадратическое отклонение совокупной случайной ошибки измерений. Последнее является ключевой характеристикой, отражающей прецизионность измерений².

Теоретические основы разработанной методики. Комплексное значение сигнала (тока или напряжения) на выходе устройства СВИ можно описать следующим выражением:

$$\underline{A}_n = \underline{A}_t \cdot \underline{K} + \underline{e}, \quad (1)$$

где \underline{A}_t – истинное значение вектора тока или напряжения (всегда неизвестная величина); \underline{A}_n – вектор сигнала, рассчитанный устройством СВИ; \underline{K} – комплексный коэффициент коррекции, близкий к единице, учитывающий систематическую ошибку; \underline{e} – несистематическая, или случайная, ошибка.

Все переменные, входящие в выражение (1), являются комплексными вследствие наличия как угловых, так и амплитудных погрешностей. Коэффициент коррекции \underline{K} главным образом учитывает погрешности трансформаторов тока и напряжения. Несмотря на то, что эти погрешности неизвестны, в установленном режиме, характеризуемом относительно небольшими изменениями токов и напряжений, их можно считать приблизительно постоянными [8]. Этим же коэффициентом учитываются и ошибки устройства СВИ, также приблизительно постоянные при работе в диапазоне токов и напряжений, близких к номинальным значениям [9]. Таким образом, коэффициент \underline{K} учитывает все систематические погрешности векторных измерений.

¹ IEEE Std C37.118.1-2011: IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. – New York, NY, USA: IEEE, December 2011.

² ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1: основные положения и определения. – Введ. 2002-11-01.

Ключевым в определении систематических погрешностей является то, что они постоянны лишь «приблизительно». Все отклонения от некоего среднего значения учитываются случайной ошибкой e (или «шумом» измерений), величина которой существенно изменяется от измерения к измерению, в том числе и по знаку. На станции или подстанции, где установлено устройство СВИ, можно отметить следующие возможные источники «шума» векторных измерений:

- 1) аналого-цифровые преобразователи и другие элементы устройств СВИ;
- 2) устройства синхронизации;
- 3) измерительные трансформаторы;
- 4) контрольно-измерительные цепи.

Наличие некоторого количества независимых или слабо зависимых источников случайной ошибки позволяет полагать, что совокупная случайная ошибка подчинена закону нормального распределения. Основанием для подобного заявления является центральная предельная теорема [10]. Отдельные случайные ошибки, слагающие совокупный «шум» измерений, в общем случае могут быть подчинены другим законам распределения.

Выражение для плотности вероятности, описывающей нормальный закон распределения в конкретном случае, содержит две неизвестные – математическое ожидание μ и среднеквадратическое отклонение σ . Поскольку все систематические, т.е. «смещенные» ошибки нами учитываются отдельно – посредством коэффициента K в выражении (1), то математическое ожидание, очевидно, стремится к нулю при большом числе измерений. Среднеквадратическое отклонение σ или дисперсия σ^2 неизвестны. Помимо этого, они являются уникальными для определенной комбинации оборудования и конкретных условий на подстанции. Вместе с тем параметр σ можно считать главной характеристикой, отражающей прецизионность измерений и несущей важную информацию для тестирования алгоритмов [6, 7]. В связи с этим необходимо разработать методику определения приблизительного значения этого параметра.

Следует отметить, что для того, чтобы все нижеисследующие вычисления были математически корректными, а также достоверными с точки зрения статистики, действительные и мнимые части всех векторов тока и напряжения должны быть рассмотрены отдельно и, кроме того, должен быть проанализирован достаточно большой массив данных (по крайней мере, несколько тысяч измерений). Каждое из действительных чисел, таких как амплитуда, действительная или мнимая часть вектора, а также фазовый угол, можно описать тем же уравнением (1), в каждом случае со своими параметрами (действительными, а не комплексными). Поэтому здесь и далее будем

подразумевать, что в выражения входят только действительные числа.

Вычисляя разность двух последовательных измерений сигнала, получим

$$A_{n,i+1} - A_{n,i} = (A_{t,i+1} - A_{t,i})K + (e_{i+1} - e_i),$$

или

$$\Delta A_{n,j} = \Delta A_{c,j} + (e_{i+1} - e_i), \quad (2)$$

где $\Delta A_{c,j}$ отражает изменение истинного значения сигнала, умноженного на константу – коэффициент коррекции, а $\Delta A_{n,j}$ – общее изменение сигнала, которое можно легко вычислить из полученных от устройства СВИ данных.

Принимая во внимание (2), если каждое измерение с нечетным номером (1, 3, 5 и т.д.) вычитается из следующего непосредственно за ним измерения с четным номером (2, 4, 6 и т.д.), получим

$$\sum_{j=1}^{m=n/2} (\Delta A_{n,j})^2 = [\Delta A_{c,1} + (e_2 - e_1)]^2 + [\Delta A_{c,2} + (e_4 - e_3)]^2 + [\Delta A_{c,3} + (e_6 - e_5)]^2 + \dots + [\Delta A_{c,m} + (e_n - e_{n-1})]^2,$$

или

$$\sum_{j=1}^{m=n/2} (\Delta A_{n,j})^2 = \sum_{j=1}^{m=n/2} [\Delta A_{c,j} + (e_{2j} - e_{2j-1})]^2. \quad (3)$$

Правую часть выражения (3) можно разделить на следующие компоненты:

$$B_1 = \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2, \quad (4)$$

$$B_2 = \sum_{j=1}^m (e_{2j} - e_{2j-1})^2, \quad (5)$$

$$B_3 = \sum_{j=1}^m [2 \cdot \Delta A_{c,j} \cdot (e_{2j} - e_{2j-1})]. \quad (6)$$

Можно утверждать, что при достаточно большом m выполняются следующие соотношения:

$$B_1 \gg B_3, \quad (7)$$

$$B_2 \gg B_3. \quad (8)$$

Строгое аналитическое доказательство (7) и (8) является трудоемкой задачей, либо такое доказательство вообще невозможно. Однако большое количество числовых данных, полученных в результате обработки массивов измерений от различных устройств СВИ, свидетельствует о том, что (7) и (8) всегда выполняются на практике. Действительно, токи и напряжения установившегося режима изменяются в пределах достаточно ограниченного диапазона, и эти изменения носят несколько хаотичный характер (хотя и предсказуемый в целом, если рассматривать изменение сигнала на протяжении нескольких часов). На рис. 1 в качестве примера представлены изменения амплитуд токов всех фаз, измеренных устрой-

ствами СВИ с двух сторон линии электропередачи. Их анализ показывает, что большое количество положительных приращений суммы (6) будет нивелироваться отрицательными приращениями, поэтому абсолютное значение суммы (6) при большом m всегда существенно меньше каждой из сумм (4) и (5).

Исходя из соотношений (4)–(8), тождество (3) можно аппроксимировать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^m (\Delta A_{n,j})^2 \approx \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \sum_{j=1}^m (e_{2,j} - e_{2,j-1})^2. \quad (9)$$

Сумму (5), в свою очередь, также можно разложить на три компонента:

$$C_1 = \sum_{j=1}^m (e_{2,j})^2; \quad (10)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^m (e_{2,j-1})^2; \quad (11)$$

$$C_3 = \sum_{j=1}^m (-2 \cdot e_{2,j} \cdot e_{2,j-1}). \quad (12)$$

Аналогично соотношениям (7) и (8), можно утверждать следующее:

$$C_1 \gg C_3; \quad (13)$$

$$C_2 \gg C_3. \quad (14)$$

Ошибки в каждой паре $(e_{2,j-1}, e_{2,j})$, хотя и принадлежат одной совокупности нормально распределенных величин, представляют собой два независимых значения. Таким образом, сумма (12) является совокупностью поэлементных произведений двух независимых выборок, подчиняющихся закону нормального распределения. Известно, что две независимые случайные величины всегда являются некоррелированными [10]. Фактически это означает, что каждое попарное произведение в сумме (12) может принимать положительный или отрицательный знак с равной вероятностью. Поэтому при большом m большое количество положительных приращений суммы (12) нивелируется отрицательными приращениями, тогда как все слагаемые сумм (10) и (11) неотрицательны. Следовательно, соотношения (13) и (14) справедливы, что подтверждается многочисленными численными примерами.

Принимая во внимание выражения (10)–(14), можно переписать (9) следующим образом:

$$\sum_{j=1}^m (\Delta A_{n,j})^2 \approx \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \sum_{j=1}^m (e_{2,j})^2 + \sum_{j=1}^m (e_{2,j-1})^2,$$

или

$$\sum_{j=1}^m (\Delta A_{n,j})^2 \approx \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \sum_{j=1}^{2 \cdot m} (e_j)^2. \quad (15)$$

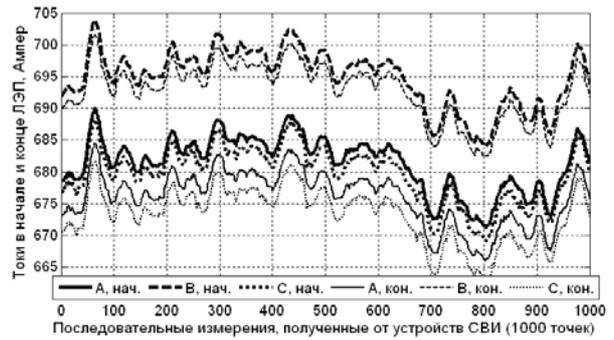


Рис. 1. Изменения амплитуд токов, измеренных устройствами СВИ с двух сторон воздушной линии электропередачи 345 кВ (Висконсин, США)

Еще одна аппроксимация, которую нам необходимо сделать, касается среднего значения всех изменений, или флуктуаций, сигнала ΔA_n . Будем полагать, что при достаточно большом m средним значением можно пренебречь, или, говоря более строго, можно считать его существенно меньшим по сравнению со средним значением модулей всех флуктуаций:

$$\frac{\sum_{j=1}^m \Delta A_{n,j}}{m} \ll \frac{\sum_{j=1}^m |\Delta A_{n,j}|}{m}. \quad (16)$$

Справедливость выражения (16) подтверждается многочисленными численными примерами, а также обосновывается уже отмеченным выше обстоятельством: положительные изменения сигнала во многом перекрываются равными или близкими по модулю отрицательными изменениями. Рис. 1 служит наглядным примером подобного поведения сигналов (в данном случае токов). На практике токи и напряжения могут время от времени изменяться несколько скачкообразно даже в установившемся режиме, что может быть вызвано, например, различными коммутациями в электрической сети, прилегающей к рассматриваемому участку. Рис. 2 является иллюстрацией подобного скачкообразного изменения сигнала – мнимой части вектора напряжения фазы А в начале линии. Изменение сигнала между точками 1 и 2 по абсолютной величине значительно больше среднего изменения, и учет нескольких подобных (или еще больших) девиаций может исказить результаты нашего анализа, поэтому единственный выход – игнорировать их.

Среднеквадратическое отклонение флуктуаций сигнала, измеряемого устройством СВИ, определяется следующим образом:

$$\sigma(\Delta A_n) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m [\Delta A_{n,j} - \mu(\Delta A_n)]^2}. \quad (17)$$



Рис. 2. Иллюстрация скачкообразного изменения сигнала, в данном случае – мнимой части вектора напряжения фазы А в начале линии 345 кВ (Висконсин, США)

Принимая во внимание эмпирический вывод (16), получаем

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta A_{n,j})^2} \quad (18)$$

и, учитывая (15), последовательно записываем:

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^{2m} (e_j)^2};$$

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \frac{2m-1}{m-1} \cdot \frac{1}{2m-1} \sum_{j=1}^{2m} (e_j)^2};$$

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + \frac{2m-1}{m-1} \sigma^2(e)};$$

$$\sigma(\Delta A_n) \approx \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta A_{c,j})^2 + 2 \cdot \sigma^2(e)}. \quad (19)$$

Выражение (19) позволяет сформулировать важный вывод: среднее квадратическое отклонение флуктуаций сигнала, измеренного устройством СВИ, которое можно легко вычислить из большого массива данных, неявно включает среднее квадратическое отклонение кумулятивной случайной ошибки, сопровождающей векторные измерения.

Первое из двух слагаемых в подкоренной сумме (19) фактически выражает дисперсию флуктуаций измеренного сигнала при отсутствии «шума» измерений. Эта величина всегда положительна, иначе токи и напряжения никогда бы не изменялись, что невозможно. Однако мы не можем отделить данное слагаемое от второго, содержащего информацию об ошибке, можно вычислить лишь общую подкоренную сумму. Поэтому справедливо утверждать, что среднее квадратическое отклонение совокупной случайной ошибки, сопровождающей синхронизированные векторные измерения в установившемся режиме, подчиняется следующему неравенству:

$$\sigma(e) < \frac{\sigma(\Delta A_n)}{\sqrt{2}}. \quad (20)$$

Выражение (20) является удобным способом оценки среднее квадратического отклонения «шума» векторных измерений на практике. Напомним, что оно справедливо только для действительных чисел, поэтому абсолютные значения, действительные и мнимые части векторов должны рассматриваться отдельно.

Практические результаты. Разработанный алгоритм определения максимального значения среднее квадратического отклонения случайной ошибки был применен к нескольким массивам данных, полученных от устройств СВИ, установленных на трех различных воздушных линиях напряжением 345 кВ. Все данные были предоставлены специалистами American Transmission Company (США). Ниже приведем результаты обработки двух массивов данных для двух разных линий: обозначим их Л1 и Л2.

Линия Л1 (рис. 3) характеризуется тем, что с обеих ее сторон установлены однотипные устройства СВИ: функция СВИ интегрирована в устройство релейной защиты и автоматики (УРЗ). Все выходные данные хранятся в формате 32-битных чисел с плавающей точкой. Исходный массив данных, результаты обработки которого представлены ниже, содержит 20 минут измерений, что соответствует 36000 точек данных для каждого вектора тока и напряжения при частоте обработки сигналов, равной 30 раз в секунду.

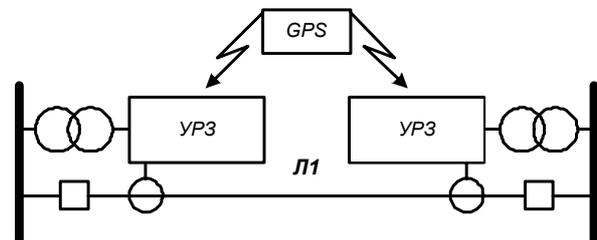


Рис. 3. Общая идеология выполнения синхронизированных векторных измерений токов и напряжений по концам линии Л1

С одной стороны линии Л2 (рис. 4), условно принятой нами за конец линии, функцию СВИ выполняет УРЗ такого же типа, как и на линии Л1. С противоположной же стороны линии Л2, условно принятой нами за начало линии, векторные измерения производятся цифровым регистратором аварийных повреждений (ЦРАП), а все выходные данные измерений хранятся в формате 16-битных целых чисел. Исходный массив данных содержит 15 минут измерений, или 27000 значений для каждого комплекса тока и напряжения.

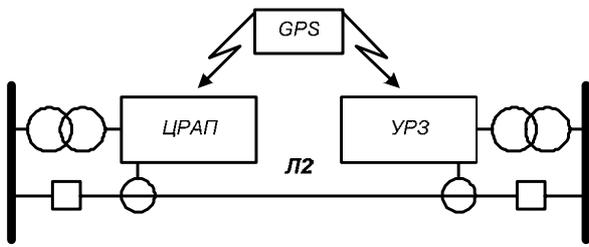


Рис. 4. Общая идеология выполнения синхронизированных векторных измерений токов и напряжений по концам линии Л2

Перед тем как применить описанную выше методику определения статистических свойств случайной ошибки, в массивах данных необходимо отфильтровать заведомо некорректные и прочие «недостаточно достоверные» измерения, число которых мало, но которые неизбежно встречаются в реальности. Кроме того, необходимо предотвратить поворот всей системы векторов на каждом шаге измерений, приводящий к тому, что углы комплексов тока и напряжения принимают значения в диапазоне от -180° до 180° , а мнимые и действительные части постоянно изменяют знак. Это является нормальным поведением, и все угловые разности между любыми двумя векторами вычисляются верно, однако картина истинного изменения мнимой или действительной части конкретного вектора от точки к точке искажается. Поэтому в целях достоверности нашего анализа необходимо предотвратить вращение системы векторов как целого, а рассматривать лишь изменения внутри системы (рис. 5). Описание соответствующей процедуры, равно как и алгоритма фильтрации недостоверных данных, выходит за рамки настоящего исследования.

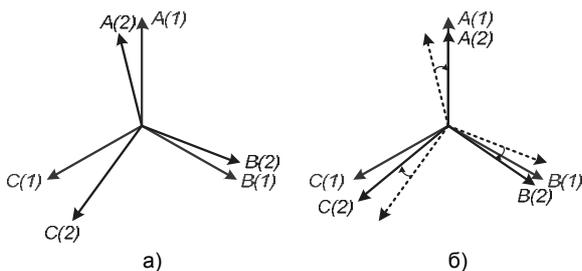


Рис. 5. Постоянно вращающаяся система векторов (а) и система, в которой происходит лишь изменение взаимного расположения отдельных векторов, но не вращение системы в целом (б)

Предложенная методика определения среднеквадратического отклонения случайной ошибки может быть верифицирована с использованием следующего подхода. Поскольку истинные значения сигналов нам не известны и узнать их невозможно, будем считать полученные от устройств СВИ данные «истинными», или некоторыми исходными измерениями. Далее генерируются случайные ошибки с нулевым математическим ожиданием и заданными стандартными отклонениями с использованием генератора нормально распределенных псевдослучайных чисел в MATLAB, данные ошибки добавляются к действительным и мнимым частям всех исходных векторов. Затем вычисляется среднеквадратическое отклонение изменений сгенерированного «шумного» сигнала с использованием точной формулы (17). Это же значение определяется посредством приближенной формулы (19). Вычисление правой части (19) в данном случае не вызывает затруднений, поскольку нам известны и все флуктуации исходного сигнала $\Delta A_{c,j}$, и среднеквадратическое отклонение сгенерированной ошибки $\sigma(\epsilon)$. Выражение (19) автоматически учитывает все принятые допущения: (7), (8), (13), (14) и (16). Приблизительное равенство результатов, полученных с использованием точной формулы (17) и аппроксимации (19), будет свидетельствовать о том, что (19) является хорошим приближением. Это, в свою очередь, будет означать, что неравенство (20), непосредственно следующее из (19), верно и наш подход к приближенному определению $\sigma(\epsilon)$ корректен.

В табл. 1 сведены результаты верификации по предложенной методике для линии Л1, а в табл. 2 – для линии Л2. Анализ полученных данных (табл. 1,2, последние колонки) свидетельствует, что погрешность при использовании формулы (19) не превышает 1%.

Таблица 1. Результаты добавления «шума» к исходным данным и верификация алгоритма оценки среднеквадратического отклонения ошибки измерений для линии Л1

Сигнал	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала перед добавлением «шума»	Среднеквадратическое отклонение «шума» (добавленной случайной ошибки)	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала после добавления «шума», точно	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала после добавления «шума», приблизительно	% совпадения точного и приближительного результатов
Re(U_A), нач., В	0,685	10,056	14,35	14,24	99,22
Im(U_A), нач., В	38,92	9,988	41,36	41,41	100,1
Re(U_B), нач., В	36,84	9,9904	39,44	39,45	100
Im(U_B), нач., В	30,72	10,002	33,86	33,82	99,87
Re(U_C), нач., В	33,41	9,9587	36,35	36,25	99,73
Im(U_C), нач., В	29,11	10,011	32,46	32,37	99,72
Re(U_A), кон., В	12,2	10,054	18,71	18,74	100,1
Im(U_A), кон., В	28,97	9,9935	32,28	32,23	99,85
Re(U_B), кон., В	31,33	10,035	34,44	34,39	99,86
Im(U_B), кон., В	25,19	10,02	28,81	28,91	100,3
Re(U_C), кон., В	23,97	10,023	27,69	27,85	100,5
Im(U_C), кон., В	28,38	9,978	31,73	31,69	99,89
Re(I_A), нач., А	0,158	0,099	0,211	0,211	100,1
Im(I_A), нач., А	0,222	0,0998	0,265	0,263	99,41
Re(I_B), нач., А	0,188	0,1003	0,235	0,236	100,4
Im(I_B), нач., А	0,187	0,1004	0,234	0,234	100,2
Re(I_C), нач., А	0,223	0,1001	0,264	0,264	99,82
Im(I_C), нач., А	0,14	0,0997	0,197	0,198	100,7
Re(I_A), кон., А	0,171	0,0995	0,22	0,221	100,3
Im(I_A), кон., А	0,235	0,1	0,275	0,274	99,51
Re(I_B), кон., А	0,197	0,1	0,244	0,242	99,51
Im(I_B), кон., А	0,199	0,1004	0,244	0,244	99,98
Re(I_C), кон., А	0,237	0,1004	0,276	0,276	100,1
Im(I_C), кон., А	0,143	0,0999	0,201	0,201	99,99

Примечание. Название сигнала в первой колонке означает действительную или мнимую часть вектора тока или напряжения одной из трех фаз в начале или конце линии, например: Re(U_A), нач., В – представляет собой действительную часть вектора напряжения фазы А в начале линии, измеряемую в вольтах; Im(I_C), кон., А – обозначает мнимую часть вектора тока фазы С в конце линии, измеряемую в амперах.

Таблица 2. Результаты добавления «шума» к исходным данным и верификация алгоритма оценки среднеквадратического отклонения ошибки измерений для линии Л2

Сигнал	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала перед добавлением «шума»	Среднеквадратическое отклонение «шума» (добавленной случайной ошибки)	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала после добавления «шума», точно	Среднеквадратическое отклонение изменений сигнала после добавления «шума», приблизительно	% совпадения точного и приближительного результатов
Re(U_A), нач., В	15,89	10,025	21,41	21,3	99,48
Im(U_A), нач., В	12,84	9,9804	19,2	19,08	99,38
Re(U_B), нач., В	45,57	10,015	47,69	47,72	100,1
Im(U_B), нач., В	23,23	9,9522	27,18	27,16	99,91
Re(U_C), нач., В	20,06	10,008	24,66	24,55	99,57
Im(U_C), нач., В	46,5	10,045	48,71	48,62	99,81
Re(U_A), кон., В	25	9,975	28,73	28,7	99,89
Im(U_A), кон., В	29,32	9,9306	32,48	32,51	100,1
Re(U_B), кон., В	30,67	9,9914	33,74	33,77	100,1
Im(U_B), кон., В	17,27	9,9497	22,34	22,27	99,69
Re(U_C), кон., В	24,36	9,9121	28,19	28,1	99,7
Im(U_C), кон., В	29,09	10,067	32,28	32,38	100,3
Re(I_A), нач., А	0,459	0,1997	0,537	0,539	100,3
Im(I_A), нач., А	0,499	0,2014	0,576	0,575	99,73
Re(I_B), нач., А	0,687	0,1996	0,741	0,742	100,2
Im(I_B), нач., А	0,665	0,1996	0,724	0,722	99,77
Re(I_C), нач., А	0,511	0,1999	0,586	0,584	99,67
Im(I_C), нач., А	0,458	0,2	0,538	0,538	100,1
Re(I_A), кон., А	0,244	0,0998	0,282	0,282	100
Im(I_A), кон., А	0,274	0,1003	0,31	0,309	99,65
Re(I_B), кон., А	0,265	0,101	0,3	0,301	100,4
Im(I_B), кон., А	0,265	0,1001	0,301	0,301	99,87
Re(I_C), кон., А	0,269	0,0991	0,305	0,304	99,65
Im(I_C), кон., А	0,229	0,1004	0,269	0,269	99,98

Теперь, когда разработанный алгоритм верифицирован, применим его для оценки среднеквадратического отклонения случайной ошибки измерений на линии Л1 (табл. 3) и линии Л2 (табл. 4).

Таблица 3. Среднеквадратические отклонения случайной ошибки СВИ для линии Л1

Сигнал	Среднеквадратическое отклонение случайной ошибки измерений, менее чем	Среднеквадратическое отклонение случайной ошибки измерений для выделенной группы сигналов, в среднем, менее чем
Re(U_A), нач., В	0,484	20
Im(U_A), нач., В	27,52	
Re(U_B), нач., В	26,05	
Im(U_B), нач., В	21,72	
Re(U_C), нач., В	23,62	
Im(U_C), нач., В	20,58	
Re(U_A), кон., В	8,629	17,68
Im(U_A), кон., В	20,48	
Re(U_B), кон., В	22,15	
Im(U_B), кон., В	17,81	
Re(U_C), кон., В	16,95	
Im(U_C), кон., В	20,07	
Re(I_A), нач., А	0,112	0,132
Im(I_A), нач., А	0,157	
Re(I_B), нач., А	0,133	
Im(I_B), нач., А	0,132	
Re(I_C), нач., А	0,158	
Im(I_C), нач., А	0,099	
Re(I_A), кон., А	0,121	0,139
Im(I_A), кон., А	0,166	
Re(I_B), кон., А	0,139	
Im(I_B), кон., А	0,141	
Re(I_C), кон., А	0,167	
Im(I_C), кон., А	0,101	

Примечание. Относительно низкое значение среднеквадратического отклонения ошибки для действительной части вектора напряжения фазы А в начале линии (всего 0,484 В) объясняется тем, что угол этого вектора напряжения на комплексной плоскости очень близок к -90° . В то же время изменения соответствующей мнимой части вектора значительны.

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что «шумы» синхронизированных векторных измерений, производимых с двух сторон линии Л1, практически идентичны. Это объясняется использованием оборудования одинакового вида (функция СВИ в однотипном терминале защиты) и одинакового формата представления данных (32-битные числа с плавающей точкой). Рис. 6 служит наглядной иллюстрацией того, что сигналы в начале и конце линии сильно коррелированы и характер изменения сигналов от точки к точке схож.

Таблица 4. Среднеквадратические отклонения случайной ошибки СВИ для линии Л2

Сигнал	Среднеквадратическое отклонение случайной ошибки измерений, менее чем	Среднеквадратическое отклонение случайной ошибки измерений для выделенной группы сигналов, в среднем, менее чем
Re(U_A), нач., В	9,099	15,69
Im(U_A), нач., В	7,355	
Re(U_B), нач., В	26,17	
Im(U_B), нач., В	13,16	
Re(U_C), нач., В	11,77	
Im(U_C), нач., В	26,56	
Re(U_A), кон., В	13,47	14,77
Im(U_A), кон., В	16,66	
Re(U_B), кон., В	18,83	
Im(U_B), кон., В	9,866	
Re(U_C), кон., В	12,2	
Im(U_C), кон., В	17,59	
Re(I_A), нач., А	0,296	0,353
Im(I_A), нач., А	0,317	
Re(I_B), нач., А	0,446	
Im(I_B), нач., А	0,439	
Re(I_C), нач., А	0,329	
Im(I_C), нач., А	0,292	
Re(I_A), кон., А	0,147	0,155
Im(I_A), кон., А	0,17	
Re(I_B), кон., А	0,145	
Im(I_B), кон., А	0,169	
Re(I_C), кон., А	0,173	
Im(I_C), кон., А	0,126	

В отличие от линии Л1, максимально возможные среднеквадратические отклонения случайной ошибки, оцененные для токовых сигналов линии Л2, резко отличаются на двух сторонах линии – более чем в два раза (табл. 4). При этом ошибка измерений на конце линии существенно ближе к аналогичным значениям, полученным для линии Л1 (табл. 3). Значительно меньшая прецизионность токовых измерений в начале линии Л2 обусловлена, во-первых, использованием функции СВИ в ЦРАП (вместо УРЗ или отдельного устройства СВИ), а во-вторых, представлением измерений в формате 16-битных целых чисел (которые могут хранить лишь 65536 уникальных значений). Регистратор повреждений должен обладать способностью «записывать» токи коротких замыканий, которые могут составлять несколько десятков килоампер. Следовательно, при идентичных характеристиках аналого-цифровых преобразователей (прежде всего, разрядность) в ЦРАП с функцией СВИ и автономном устройстве СВИ получим, что шаг квантования у второго устройства меньше, а прецизионность измерений выше.

Анализ изменений амплитуд (рис. 7) полностью подтверждает данные рассуждения и результаты, приведенные в табл. 4: измерения токов в начале линии Л2, производимые ЦРАП, содержат существенно больше «шума», нежели измерения на другом конце линии.

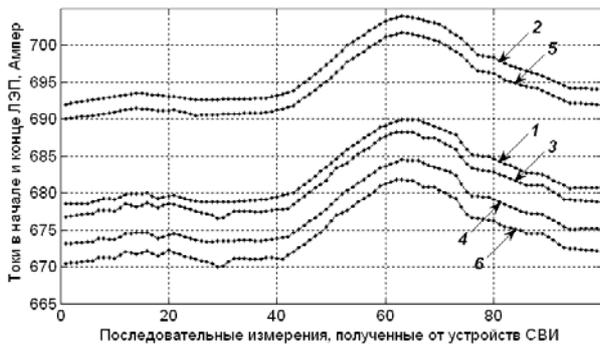


Рис. 6. Изменения амплитуд векторов тока с двух сторон линии Л1: 1 – фаза А, начало линии; 2 – фаза В, начало линии; 3 – фаза С, начало линии; 4 – фаза А, конец линии; 5 – фаза В, конец линии; 6 – фаза С, конец линии

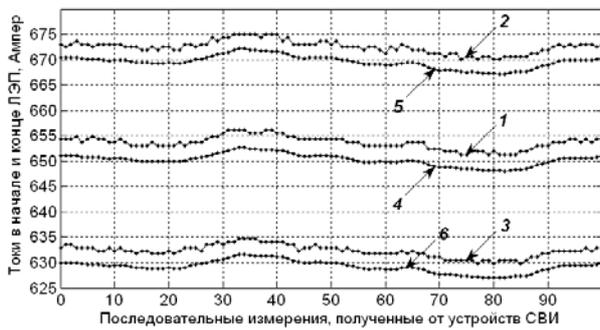


Рис. 7. Изменения амплитуд векторов тока с двух сторон линии Л2: 1 – фаза А, начало линии; 2 – фаза В, начало линии; 3 – фаза С, начало линии; 4 – фаза А, конец линии; 5 – фаза В, конец линии; 6 – фаза С, конец линии

Выражение (20) является неравенством, следовательно, как отмечалось выше, мы можем определить лишь максимальный «порог» среднеквадратического отклонения случайной ошибки измерений, поэтому в табл. 3, 4 числовые значения приведены с пометкой «менее чем» в заголовках столбцов. Вычисленные максимальные значения соответствовали бы реальным в идеализированном случае отсутствия изменений истинного значения сигнала ΔA_c в выражении (19). Поскольку каждая флуктуация отражает как вклад «шума», так и истинное изменение сигнала от точки к точке, то реальные среднеквадратические отклонения ошибок меньше оцененных максимальных значений, отраженных в табл. 3, 4. Насколько именно они меньше, точно установить невозможно, поэтому рассчитанные величины могут служить некоторым «порогом» при тестировании основанных на СВИ алгоритмов для линий Л1 и Л2, на которые прецизионность измерений оказывает существенное влияние. Очевидно, чем больший массив векторных измерений проанализирован для конкретной линии, тем точнее могут быть определены статистические данные, включая и среднеквадратическое отклонение случайной ошибки.

Необходимо отметить еще одну важную особенность, связанную с векторными измерениями, производимыми ЦРАП, и хранением данных с использованием 16-битных целых чисел.

Центральная предельная теорема, использованная нами при доказательстве того, что случайная ошибка СВИ имеет закон распределения, близкий к нормальному, справедлива, если ни одна из погрешностей, слагающих совокупную случайную ошибку, не является заметно доминирующей над остальными [10]. В то же время максимальное значение среднеквадратического отклонения ошибки для токов в начале линии Л2 более чем в два раза превосходит аналогичную величину для токов в конце линии (табл. 4). Это позволяет сделать вывод, что часть совокупной погрешности, привносимая непосредственно цифровым регистратором с функцией СВИ, может заметно превалировать над остальными. Поэтому необходимо сделать вывод о том, допустимо ли в принципе применение центральной предельной теоремы, а также разработанной методики в данном случае.

Для ответа на поставленный вопрос в программном комплексе MATLAB была смоделирована часть погрешностей СВИ, связанных с ЦРАП в начале линии Л2, а именно – были учтены ошибки квантования при аналого-цифровом преобразовании входного аналогового сигнала, а также ошибки округления при использовании формата 16-битных целых чисел для хранения вычисленных комплексных значений токов и напряжений. Любая из двух ошибок (квантования или округления), взятая по отдельности, подчиняется закону равномерного распределения, что объясняется схожей природой ошибок: квантование неизбежно сопряжено с округлением сигнала до некоторого ближайшего допустимого уровня. Равномерное распределение симметрично, но лишь центральная его часть очень близка к нормальному распределению (рис. 8).

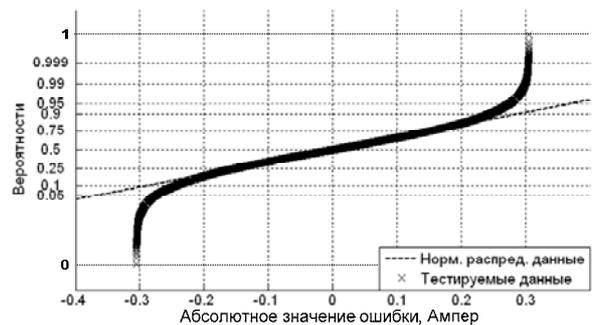


Рис. 8. Распределение ошибки, связанной с сохранением измерений в формате 16-битных целых чисел (округлением), в сравнении с нормальным распределением: 65536 чисел используются для сохранения значений токов от 0 до 40 кА

При «наложении» ошибки округления на ошибку квантования, что и происходит в реальности, совокупное распределение, помимо сохранения симметричности, будет иметь характер, уже значительно более близкий к нормальному (рис. 9). Это объясняется приведенной выше центральной предельной теоремой.

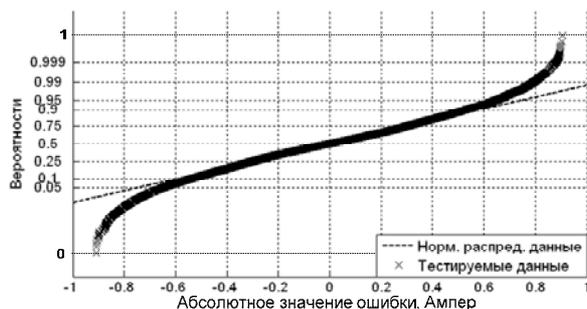


Рис. 9. Распределение совокупной ошибки, связанной и с квантованием входного аналогового сигнала, и с последующим сохранением вычисленных комплексных значений в формате 16-битных целых чисел (округлением), в сравнении с нормальным распределением

Реальные аналого-цифровые преобразователи могут иметь достаточно большое количество погрешностей различных типов (смещение передаточной характеристики, нелинейность и др.), наряду с отмеченной ошибкой квантования, присущей даже идеальному преобразователю. Помимо этого, устройства СВИ (в том числе и ЦРАП с функцией СВИ) включают множество других элементов, например фильтры [2]. Наличие большого количества слабо зависимых ошибок дает нам право применить центральную предельную теорему еще раз и считать, что совокупная случайная ошибка устройства СВИ имеет распределение, близкое к нормальному.

Таким образом, даже если погрешность ЦРАП доминирует над остальными ошибками векторных измерений, совокупная ошибка должна иметь распределение, близкое к нормальному.

Заключение

В результате проведенной теоретической и экспериментальной работы можно заключить следующее.

1. Доказано, что распределение кумулятивной случайной ошибки («шума»), сопровождающей синхронизированные векторные измерения токов и напряжений в установившемся режиме, близко к нормальному.

2. Предложенная методика позволяет оценить максимальное значение среднеквадратического отклонения случайной ошибки векторных измерений в установившемся режиме.

3. Разработанная нами методика верифицирована посредством математического моделирования с использованием MATLAB. Входными данными являлись комплексы токов и напряжений, полученные от реальных устройств СВИ.

4. С использованием предложенного алгоритма определены максимально возможные среднеквадратические отклонения случайной

ошибки векторных измерений для двух воздушных линий напряжением 345 кВ (штат Висконсин, США).

5. Выяснено, что прецизионность токовых измерений, выполненных ЦРАП с функцией СВИ, в целом существенно меньше, чем при использовании функции СВИ в УРЗ.

6. Обосновано, что доминирование погрешности, привносимой ЦРАП, над остальными ошибками не влияет на характер статистического распределения совокупной случайной ошибки.

Авторы выражают благодарность инженерам компании American Transmission Company (США) за предоставленный массив векторных измерений, использованный для верификации и применения разработанных авторами алгоритмов.

Список литературы

1. Chakrabarti S., Kyriakides E., Bi T., Cai D., Terzija V. Measurements get together // IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15–23.
2. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – Springer, 2008.
3. New technology can improve electric power system efficiency and reliability / U.S. Energy Information Administration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=5630>, свободный (20.10.2013).
4. Развитие устройств синхронизированных векторных измерений / С.Г. Попов, М.А. Балабин, В.Г. Наровлянский и др. // Энергоэксперт. – 2011. – № 5. – С. 54–55.
5. Adamiak M., Premierani W., Kaszenny B. Synchrophasors: definition, measurement, and application // Protection and Control Journal, GE Multilin. – September 2006. – P. 57–62.
6. Liao Y., Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications // IEEE Transactions on Power Delivery. – January 2009. – Vol. 24, no. 1. – P. 96–102.
7. Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров одноцепных нетранспонированных линий электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений // ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ. Специальный выпуск № 1. – Иваново, 2013. – С. 325–329.
8. Doig P., Gunn C., Durante L., Burns C., Cochran M. Reclassification of relay-class current transformers for revenue metering applications. Proc. 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, May 21–24, 2006.
9. Huang Z., Faris T., Martin K., Hauer J.F., Bonebrake C.A., Shaw J.M. Laboratory performance evaluation report of SEL 421 phasor measurement unit, report by Pacific Northwest National Laboratory, December 2007.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 4-е изд., стереотипное. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

References

1. Chakrabarti, S., Kyriakides, E., Bi, T., Cai, D., Terzija, V. Measurements get together. IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15–23.
2. Phadke, A.G., Thorp, J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008.
3. U.S. Energy Information Administration (2012) *New technology can improve electric power system efficiency and reliability*. Available at: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=5630> (Ac-

cessed: 20 October 2013).

4. Popov, S.G., Balabin, M.A., Narovlyanskiy, V.G., Vaganov, A.B., Peregudov, S.A., Kirillov, A.S., Kuz'min, A.A. Razvitie ustroystv sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [Evolution of phasor measurement units]. *Energoekspert*, 2011, issue 5, pp. 54–55.

5. Adamiak, M., Premerlani, W., Kasztenny, B. Synchrophasors: definition, measurement, and application. *Protection and Control Journal, GE Multilin*, September 2006, pp. 57–62.

6. Liao, Y., Kezunovic, M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, January 2009, vol. 24, no. 1, pp. 96–102.

7. Ivanov, I.E., Murzin, A.Yu. Razrabotka algoritma identifikatsii aktual'nykh parametrov odnotsepykh netransponirovannykh liniy elektroperedachi na osnove tekhnologii sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [Development of an

algorithm aimed at the identification of single-circuit untransposed transmission line parameters in real time based on synchronized phasor measurements]. *Vestnik Rossiyskogo natsional'nogo komiteta SIGRE*, 2004, special issue 1, pp. 325–329.

8. Doig, P., Gunn, C., Durante, L., Burns, C., Cochran, M. Reclassification of relay-class current transformers for revenue metering applications. *Proc. 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, May 21-24, 2006*.

9. Huang, Z., Faris, T., Martin, K., Hauer, J.F., Bonebrake, C.A., Shaw, J.M. Laboratory performance evaluation report of SEL 421 phasor measurement unit, report by Pacific Northwest National Laboratory, December 2007.

10. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow: Nauka, 1969. 576 p.

Иванов Игорь Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: iivanov@mtu.edu

Мурзин Андрей Юрьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрических систем, e-mail: murzin@rza.ispu.ru