

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье приведены результаты модельных исследований методов контроля качества электрической энергии (применительно к тяговой подстанции) в процессе ее преобразования, распределения и питания тяговых и нетяговых потребителей. Для выявления наиболее точного метода определения амплитуды сигнала произведено сравнение алгоритмов, основанных на стандартном преобразовании Фурье и вейвлет-анализе с постоянной и адаптивной шириной окна вейвлета. Рассмотрены перспективы использования алгоритмов для контроля качества электрической энергии при наличии перенапряжения, провала напряжения и быстро меняющегося уровня напряжения. Исследования выполнялись методом математического моделирования с использованием интерактивной среды для научных и инженерных расчетов MATLAB. Проведенные опыты отражают перспективы использования вейвлет-анализа для оценки амплитуды сигнала.

**Ключевые слова:** адаптивный вейвлет-анализ, параметры качества энергии, компьютерное моделирование, моделирование электрического сигнала, оценка параметров электрической энергии, моделирование MATLAB.

**Введение.** В статье производится анализ методов контроля качества электрической энергии применительно к тяговой подстанции, характеризующейся быстрыми и непериодическими процессами, такими как фликеры, перенапряжения и провалы напряжения в процессе преобразования, распределения и питания тяговых и нетяговых потребителей. Задача исследования заключается в сравнительном анализе методов оценивания мгновенной амплитуды (усредненной на не коротком временном интервале) с целью выяснения, какой метод позволяет получить наименьшую ошибку измеряемой амплитуды сигнала.

Рассматриваются три метода оценивания:

1) стандартный метод, основанный на Фурье-анализе или вычислении среднеквадратического значения отфильтрованного гармонического сигнала, регламентированный государственным стандартом [1, 2];

2) вейвлет-анализ с постоянной шириной вейвлет-функции [3];

3) вейвлет-анализ с переменной (адаптируемой) шириной окна [3].

Процесс обработки сигналов базируется на анализе синусоидальных колебаний измеряемой величины в частотной области. Такого рода анализ дает

информацию, недоступную во временной области, а именно представление о гармониках, присутствующих в зарегистрированном сигнале и их влиянии на форму сигнала во временной области.

В числе проблем, влияющих на результаты анализа сигнала, особенно выделяют определение наличия шума: постоянного или кратковременного, естественного или антропогенного электромагнитного фона среды распространения сигнала. Нестационарность сигнала во временной области также может влиять на результаты оценки его параметров, в особенности, если изменения сигнала носят кратковременный характер.

Использование преобразования Фурье часто не дает высокой точности при анализе состава сигнала в частотной области, так как этот метод рассчитан на анализ в течение всего времени регистрации. Информация о частотных составляющих имеет общий характер, частные временные изменения поведения и состава сигнала отсутствуют. Вычисление амплитуды по среднеквадратическому (действующему) значению требует точной синхронизации устройства обработки сигнала с частотой сигнала для анализа целого числа периодов. В качестве одной из альтернатив такому стандартному подходу представляется целесообразным рассматривать

вейвлет-анализ [3] (в первую очередь, с вейвлетом Морле).

Варьирование ширины вейвлет-функции, измеряемой количеством периодов колебаний исследуемой частоты, позволяет либо уточнять значение усредненной амплитуды в пределах широкого временного интервала при высоком уровне шума, либо получать представление о быстром изменении амплитуды, если уровень шумов невысок и интервал усреднения можно сократить. Положительным свойством вейвлета является его способность фильтровать анализируемый участок сигнала, выступая в роли полосно-пропускающего фильтра. Однако подбор параметров вейвлета сопряжен с некоторыми трудностями, если необходимо проанализировать не весь частотный спектр сигнала, а лишь определенную его частоту.

Для решения данной проблемы предлагается использовать алгоритм, изменяющий параметры вейвлета, исходя из характеристик анализируемого сигнала на отдельно взятом участке времени [3].

Актуальность проблемы определения более точных значений амплитуды сигнала подтверждается исследованиями с использованием моделей электрических сетей [4, 5], в том числе подключаемых к тяговым подстанциям, в которых учитываются перенапряжения и кратковременные изменения амплитуды моделируемого сигнала с помощью Фурье-преобразования, анализируемые в данной статье.

**Моделирование.** Исследования выполнялись методом математического моделирования с использованием интерактивной среды для научных и инженерных расчетов MATLAB.

В качестве анализируемого сигнала рассматривался синусоидальный сигнал частотой 50 Гц

$$s(t) = u(t) \sin(2\pi 50t + \phi(t)) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где  $t$  — время моделирования. Сигнал имеет нестационарные параметры — амплитуду  $u(t)$  и начальную фазу  $\phi(t)$ ; на сигнал накладывается шум  $\xi(t)$ .

На основании стандартов [1, 2] было выбрано три типовых закона изменения амплитуды напряжения:

— постоянное номинальное значение амплитуды:

$$u(t) = U_0, \quad (2)$$

где  $U_0 = 1$  В;

— изменение амплитуды, имеющее вид колебаний синусоидальной формы:

$$u(t) = U_0 + \Delta U \sin\left(2\pi \frac{t}{T_{ампл}}\right), \quad (3)$$

где  $\Delta U$  — отклонение амплитуды ( $\Delta U = 0,2$  В);  $T_{ампл}$  — период изменения амплитуды ( $T_{ампл} = 0,2$  с).

— изменение амплитуды, имеющее вид колебаний в форме меандра:

$$u(t) = U_0 + \Delta U \operatorname{sign}\left(\sin\left(2\pi \frac{t}{T_{ампл}}\right)\right). \quad (4)$$

При выполнении исследования учитывалось, что частота сигнала и начальная фаза не могут изменяться в реальных системах мгновенно, кроме этого, они связаны зависимостью и представляют совместную величину — мгновенную фазу. В ис-

следуемой модели сигнала задавались следующие законы изменения начальной фазы:

— постоянная фаза:

$$\phi(t) = 0; \quad (5)$$

— фаза, изменяющаяся в виде колебаний:

$$\phi(t) = d \sin\left(2\pi \frac{t}{T_\phi}\right), \quad (6)$$

где  $d$  — отклонение фазы;  $T_\phi$  — период изменения фазы. Для расчетов принимались значения:  $d = 10$ ,  $T_\phi = 0,5$  с.

Следует отметить, что немаловажное значение при оценивании амплитуды сигнала имеет вид накладываемого шума, так как характер его спектральной мощности (в особенности в области частоты полезного сигнала) может существенно влиять на результаты. При моделировании для генерации шума  $\xi(t)$  с различными спектральными характеристиками использовался сигнал с автокорреляционной функцией, имеющей экспериментальное обоснование применения в работе [6]:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\beta\tau), \quad (7)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение (СКО) сигнала;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, характеризующие затухание автокорреляционной функции и частоту периодической части процесса соответственно;  $\tau$  — временной лаг.

На рис. 1 представлена спектральная плотность шума, генерируемого при модельных исследованиях, образованного двумя независимыми источниками, имеющими корреляционные функции вида (7) с параметрами  $\alpha = 0,001$ ,  $\beta = 0,025$  и  $\alpha = 0,001$ ,  $\beta = 0,1$ . Один из источников имеет максимум спектральной плотности на исследуемой частоте 50 Гц, что соответствует наихудшему для практики случаю [7–9], когда использование полосового фильтра не позволяет устранить шум.

В процессе моделирования сигнал  $s(t)$  представляется в дискретной форме  $s(n)$ , где  $n$  — дискретное время (номер отсчета при дискретизации). Частота дискретизации принята равной  $f_d = 12,8$  кГц, что является минимальным значением, если необходимо определить регламентированные стандартом показатели качества электроэнергии.

Процесс модельного исследования можно разделить на четыре этапа.

*На первом этапе* моделируется один из трех вариантов изменения амплитуды сигнала (в соответствии с выражениями (2)–(4)) и один из двух вариантов изменения начальной фазы (в соответствии с выражениями (5)–(6)). Моделируется налагаемая на сигнал помеха (шум)  $\xi(n)$  в соответствии с автокорреляционной функцией (3) с выбранными значениями параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . В результате получается дискретная реализация сигнала  $s(n)$ .

*На втором этапе* анализируемый сигнал разделяется на равные временные интервалы длительностью  $T$ , в пределах которых проводится оценка амплитуды основной гармоники сигнала и сравнение ее с задаваемым в модели значением амплитуды  $U_i$  в середине интервала, где  $i$  — порядковый номер интервала.

Для метода, описанного в ГОСТ [2], временной интервал выборки составляет  $T = 20$  мс, что соот-

ветствует одному периоду основной гармоники, при этом длина дискретного сигнала составляет  $N=256$  отсчетов. В случае использования вейвлет-анализа размер временного промежутка принимался равным минимальной длительности вейвлет-функции [3].

На третьем этапе производится оценивание центрального значения амплитуды анализируемого сигнала на каждом  $i$ -м интервале с применением трех методов: на основе стандартного метода Фурье-анализа ( $U_{si}$ ), вейвлет-анализа с постоянной шириной окна ( $U_{ui}$ ) и вейвлет-анализа с адаптивной шириной окна ( $U_{ai}$ ).

В первом случае весь сигнал предварительно обрабатывается полосовым КИХ-фильтром (с конечной импульсной характеристикой) 40-го порядка, удаляющим шумы и интергармоники. По получившемуся в результате фильтрации сигналу  $s_{\phi}(n)$  рассчитывается среднеквадратичное значение напряжения для  $i$ -го временного интервала:

$$U_{si} = \sqrt{2 \frac{\sum_{i=0}^{N-1} s_{\phi}(n_i + n)^2}{N}}$$

где  $n_i$  — дискретное время начала  $i$ -го интервала.

При оценивании амплитуды вейвлет-анализом генерируется комплексный вейвлет Морле  $\psi(n)$ . Частота колебания вейвлета 50 Гц, величина вейвлета на границах окна 0,001. Оценки амплитуды для  $i$ -го интервала рассчитываются по следующей общей формуле:

$$U_{ui} = U_{ai} = \left| \sum_{n=0}^{N_{\psi}-1} s(n_i + n)\psi(n) \right|$$

где  $N_{\psi}$  — ширина окна вейвлета.

Ширина окна равна длине анализируемого дискретного интервала  $N$  в алгоритме с постоянной шириной при вычислении оценки  $U_u$  и варьируется в пределах от 1,5 до 8 периодов основной частоты в алгоритме с переменной (адаптивной) шириной при вычислении оценки  $U_a$ . При этом все временные интервалы имеют один и тот же центральный отсчет.

На четвертом этапе вычисляется нормированная относительно амплитуды сигнала ошибка оценивания для каждого из анализируемых временных интервалов:

$$e_{si} = \left| 1 - \frac{U_{si}}{U_i} \right|; \quad e_{ui} = \left| 1 - \frac{U_{ui}}{U_i} \right|.$$

При использовании адаптивного вейвлет-анализа нормированная ошибка рассчитывается для всех оценок амплитуды с одинаковым центральным временным отсчетом:

$$e_{ai} = \left| 1 - \frac{U_{ai}}{U_i} \right|,$$

при этом из полученных ошибок выбирается минимальная.

Временные диаграммы для ошибок оценивания амплитуды анализируемого зашумленного сигнала описанными методами при постоянных амплитуде и начальной фазе сигнала показаны на рис. 2, при

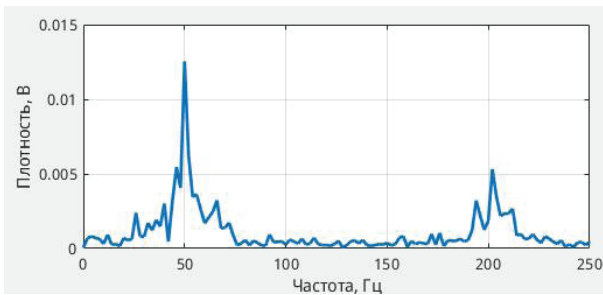


Рис. 1. Спектральная плотность моделируемого шума

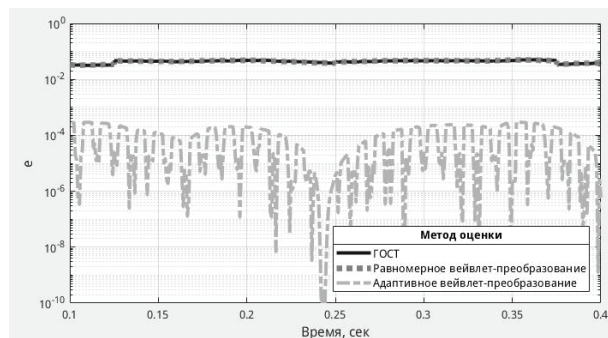


Рис. 2. Изменение ошибки оценивания амплитуды зашумленного сигнала при постоянных значениях амплитуды и начальной фазы исследуемого сигнала

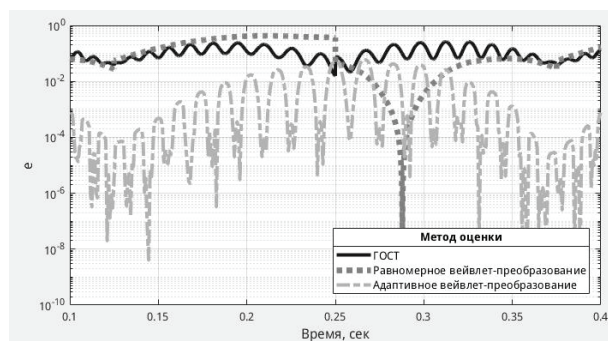


Рис. 3. Изменение ошибки оценивания амплитуды зашумленного сигнала при синусоидальных колебаниях амплитуды и начальной фазы исследуемого сигнала

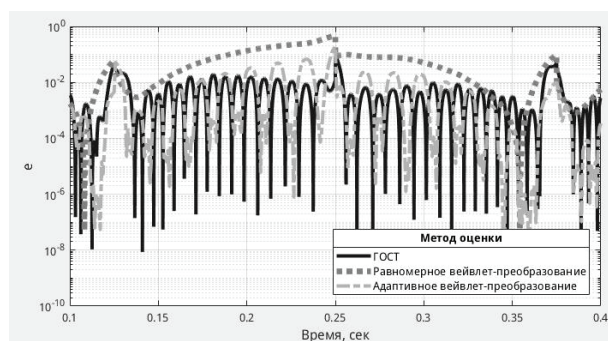


Рис. 4. Изменение ошибки оценивания амплитуды зашумленного сигнала при колебаниях амплитуды в виде меандра и синусоидальных колебаниях начальной фазы исследуемого сигнала

синусоидальных колебаниях амплитуды и синусоидальных колебаниях фазы — на рис. 3, при колебаниях амплитуды в виде меандра и синусоидальных колебаниях фазы — на рис. 4.

Характеристики ошибок оценивания амплитуды зашумленного сигнала при использовании описанных методов

Метод оценки	Параметр оценивания амплитуды	Характер изменения сигнала					
		Постоянное значение амплитуды		Синусоидальное колебание амплитуды		Колебание амплитуды в виде меандра	
		Постоянное значение начальной фазы	Синусоидальное колебание начальной фазы	Постоянное значение начальной фазы	Синусоидальное колебание начальной фазы	Постоянное значение начальной фазы	Синусоидальное колебание начальной фазы
ФП	М	0,1991	0,2097	0,3411	0,3225	0,0716	0,0724
ВП		0,1962	0,2795	0,3505	0,3351	0,0713	0,2300
АВП		0,0350	0,0663	0,0625	0,0707	0,0457	0,0851
ФП	СКО	0,0672	0,0775	0,1179	0,1045	0,0525	0,0540
ВП		0,0647	0,1772	0,1138	0,2100	0,0610	0,1475
АВП		0,0294	0,0722	0,0420	0,0820	0,0512	0,0787
ФП	КСКО	0,2643	0,2129	0,3311	0,3466	0,0759	0,0929
ВП		0,2709	0,3303	0,3283	0,4041	0,0846	0,2721
АВП		0,1003	0,1023	0,0555	0,0953	0,0615	0,1190

ФП — Фурье-преобразование, ВП — вейвлет-преобразование, АВП — адаптивное вейвлет-преобразование, М — математическое ожидание, СКО — среднеквадратическое отклонение, КСКО — корень из среднего квадрата ошибки оценивания амплитуды.

Анализ результатов показал, что в большинстве случаев, когда параметры сигнала изменяются непрерывно во времени, адаптивный вейвлет-анализ позволяет значительно снизить ошибку определения амплитуды, по сравнению со стандартным методом. При изменении амплитуды по закону (4) все анализируемые методы дают значительную ошибку. При этом ошибка адаптивного вейвлет-анализа сравнима с ошибкой стандартного метода, а вейвлет с постоянной шириной применять не следует, т.к. он дает значительно большие значения ошибок.

В табл. 1 приведены результаты расчетов (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и корень из среднего квадрата ошибки оценивания амплитуды) при проведении 1000 численных экспериментов (для всех рассмотренных комбинаций законов изменения амплитуды сигнала (2)–(4) и его начальной фазы (5), (6)). Из таблицы видно, что адаптивный вейвлет-анализ в общем случае дает меньшую ошибку оценивания амплитуды за исключением случая, когда амплитуда сигнала изменяется скачкообразно. Вейвлет-анализ менее восприимчив к шуму, в том числе если его основная спектральная мощность приходится на анализируемую частоту. По изменению уровня ошибки оценивания амплитуды на графике можно определить моменты времени, в которые происходит изменение амплитуды сигнала.

Следует добавить, что для случаев, когда огибающая амплитуды является гладкой функцией, эмпирический алгоритм адаптации получен в работе [10].

**Перспективы применения вейвлет-анализа при определении амплитуды электрического сигнала.** Представляется перспективным использование

вейвлет-анализа в случаях, если к точности оценивания кратковременных изменений амплитуды сигнала предъявляются высокие требования. Более высокий уровень контроля кратковременных процессов, таких как перенапряжение, фликер позволит составить более четкое представление об энергоэффективности электрической сети. Таким образом, использование более точного метода оценки амплитуды сигнала целесообразно для контроля и анализа энергоэффективности электрических сетей.

Рассмотрим особенности использования исследуемого электрического сигнала на тяговой подстанции. Во время функционирования инфраструктуры тяговой подстанции, которая обеспечивает энергией всех энергопотребителей, происходит специфическое воздействие на электрический ток, искажающее показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

Поезда и транспортные средства невосприимчивы к фликерам (кратковременным изменениям амплитуды напряжения питания), поскольку такие изменения широко распространены и входят в заранее заданные пределы, учтенные при проектировании потребляющих агрегатов. Искажение электрической энергии транспортными средствами достаточно велико, что способствует созданию фликеров, которые негативно воздействуют на неподвижные агрегаты тяговых подстанций. Кроме того, следует отметить, что такие быстро проходящие процессы, как провалы и перенапряжения, имеют место на железной дороге, а также возникают с определенной регулярностью. Все выше представленные параметры электрической энергии, провал напряжения, перенапряжение, фликер — оцениваются по кратковременному изменению амплитуды

сигнала [9], которое требуется находить для определения каждого из параметров.

Полученные результаты моделирования подтверждают предположение, сделанное авторами, о более высокой точности вейвлет-преобразования по сравнению с Фурье-анализом в условиях кратковременных скачков электрического сигнала при необходимости количественной оценки искажения напряжения и тока в энергосистемах.

**Заключение.** В результате проведенных модельных исследований разработанных алгоритмов, основанных на трех рассмотренных методах оценивания амплитуды зашумленного сигнала при различных законах изменения его амплитуды и начальной фазы, сделаны следующие выводы:

1. Применение вейвлет-анализа позволяет повысить точность получаемых оценок мгновенной амплитуды при наличии значительных шумов, в том числе перекрывающихся в частотной области основную гармонику исследуемого сигнала. При определении показателей качества электрической энергии ошибка полученной оценки может быть снижена в 3–5 раз по сравнению с методами, регламентированными в государственном стандарте. Повышение точности достигается в случаях, когда параметры сигнала плавно изменяются во времени.

2. При скачкообразных изменениях амплитуды сигнала применение вейвлет-анализа не позволяет повысить точность оценок, что связано с неопределенностью амплитуды в пределах анализируемого участка сигнала и невозможностью получить мгновенное значение.

3. Применение вейвлет-функции постоянной ширины не позволяет гарантированно повысить точность оценок. При высоких требованиях к обеспечению точности оценивания амплитуды сигнала необходимо применение алгоритмов адаптации ширины вейвлет-функции, учитывающей параметры шума и характер изменения параметров сигнала.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 17 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.15–2012 (МЭК 61000–4–15:2010). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. Введ. 2013–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 38 с.
3. Лаврухин А. А., Кочекоев А. В., Лобов К. В. Выбор пределов интегрирования для вейвлет-преобразования с применением функции Морле при анализе нестационарных параметров зашумленных сигналов // Радиотехника, электроника и связь: IV Междунар. науч.-техн. конф., 15–16 нояб., 2017 г. Омск, 2017. 492 с.
4. Langerudy A. T., Mariscotti A., Abolhassani M. A. Power Quality Conditioning in Railway Electrification: A Comparative Study // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, Issue 8. P. 6653–6662. DOI: 10.1109/TVT.2017.2661820.
5. Kawasaki S., Ogasawara G. Influence analyses of harmonics on distribution system in consideration of non-linear loads and estimation of harmonic source // Journal of International Council

on Electrical Engineering. 2017. Vol. 7, Issue 1. P. 76–82. DOI: 10.1080/22348972.2017.1324267.

6. Денисова Л. А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14–19.
7. Гололобова О. О., Гаврилюк В. И. Применение преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для дешифрации кода АЛСН // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. 2017. № 1 (67). С. 7–17.
8. ГОСТ 30804.3.3–2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 27 с.
9. ГОСТ 13109–97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999–01–01. М.: Стандартинформ, 1998. 52 с.
10. Кочекоев А. В., Безруков Ю. А. Анализ методов оценки параметров качества электрической энергии // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, работников образования и промышленности, 19 мая 2018 г. Омск, 2018. С. 86–90.

**ЛАВРУХИН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

SPIN-код: 2397-9198

AuthorID (РИНЦ): 547147

Адрес для переписки: lavruhinaa@gmail.com

**КОЧЕКОВ Антон Владимирович**, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

SPIN-код: 3338-6681

AuthorID (РИНЦ): 923086

Адрес для переписки: av.kochekov@gmail.com

**БЕЗРУКОВ Юрий Анатольевич**, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

SPIN-код: 2427-1814

AuthorID (РИНЦ): 998545

Адрес для переписки: bezrukov-ura@mail.ru

**ДЕНИСОВА Людмила Альбертовна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 4926-3449

AuthorID (РИНЦ): 512788

Адрес для переписки: denisova@asoju.com

#### Для цитирования

Лаврухин А. А., Кочекоев А. В., Безруков Ю. А., Денисова Л. А. Анализ методов оценки амплитуды сигнала при определении параметров качества электроэнергии // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 225–229. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-225-229.

Статья поступила в редакцию 31.10.2018 г.

© А. А. Лаврухин, А. В. Кочекоев, Ю. А. Безруков, Л. А. Денисова