

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА В СРЕДЕ MATLAB ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДЫ НАПРЯЖЕНИЯ СУДОВОЙ СИЛОВОЙ СЕТИ ПИТАНИЯ

USING OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM IN MATLAB FOR CALCULATION OF SINE DISTORTION FACTOR OF SHIP'S ELECTRICAL POWER PLANT BUSBAR

Рассмотрены принципы дискретного вейвлет-анализа в среде программирования MatLab. Произведен расчет коэффициента искажения синусоиды с помощью дискретного вейвлет-анализа, проведено сравнение данного коэффициента с общепринятым коэффициентом несинусоидальности, показана их корреляция друг с другом. Показано преимущество использования дискретного вейвлет-анализа.

Principles of discrete wavelet transform are considered in MatLab system. New coefficient of sine distortion was computed. This coefficient was compared with usual anharmonicity factor, there correlation is shown. Advantage of using the discrete wavelet transform is shown.

Ключевые слова: дискретный вейвлет-анализ, коэффициент несинусоидальности, преобразование Фурье, MatLab 7.

Key words: discrete wavelet transform, anharmonicity factor, Fourier transform, MatLab 7.

СОВРЕМЕННЫЕ судовые электроэнергетические системы содержат множество нелинейных приемников электроэнергии. В первую очередь это силовая полупроводниковая преобразовательная техника и асинхронные электродвигатели. Нелинейные приемники создают электромагнитные помехи и ухудшают качество электрической энергии (прежде всего искажают синусоиду напряжения судовой силовой сети питания). Электромагнитные помехи могут быть причиной сбоев в работе цифровых систем управления на судне. Низкое качество электроэнергии увеличивает потери в электрических машинах. Для обеспечения контроля параметров качества электрической энергии целесообразно иметь методику определения степени влияния конкретной помехи на форму напряжения судовой силовой сети питания с учетом времени возникновения и существования помехи, а также выявления возможного источника помехи.

В качестве средства контроля качества электрической энергии в судовых условиях могут использоваться цифровые осциллографы, оснащенные соответствующим программным обеспечением. Современные осциллографы используют встроенный аппарат гармонического анализа на основе рядов Фурье.

Мгновенные значения напряжения в судовой силовой сети питания являются периодической функцией, которая в идеале должна быть синусоидой. Однако эта функция реально может отличаться от синусоиды. Кроме того, возможны различные отклонения от синусоиды на разных периодах, что обусловлено динамической нагрузкой судовой сети и коммутациями в ней. Анализ на основе рядов Фурье позволяет выявить высшие гармоники в кривой напряжения, но предполагает, что эти гармоники одинаковы на всех периодах. На практике это не соответствует действительности.

В существующей электротехнической практике наличие высших гармоник оценивается с помощью коэффициента несинусоидальности [1]. Согласно ГОСТ Р 54149-2010 коэффициент несинусоидальности должен определяться с периодичностью 0,2 с с усреднением на интервале 10 мин [1]. Для анализа качества электроэнергии современных судовых электростанций данные временные показатели слишком большие. Разложение в ряд Фурье требует конечное число отсчетов исследуемого сигнала, то есть задержка анализа оказывается равной нескольким периодам несущей частоты. При наличии в исследуемом сигнале ступенчатых изменений спектр Фурье выдает множество высших гармоник малой амплитуды, что затрудняет распознавание особенностей сигнала [2]. Для упрощения и ускорения расчетов приходится уменьшать число гармоник в спектре, что заметно ухудшает точность восстановления сигнала при обратном преобразовании. Кроме того, представляя сигнал в виде суммы синусоид, мы так или иначе идеализируем его. Как видим, разложение в ряд Фурье не позволяет с высокой точностью определить как время возникновения помехи, так и текущее значение коэффициента несинусоидальности.

Перечисленные выше особенности изменения мгновенных значений напряжения судовой силовой сети питания могут быть учтены с помощью вейвлет-анализа [5]. Базисные функции (вейвлеты), на которых основывается вейвлет-анализ, позволяют более точно проанализировать форму питающего напряжения и учесть особенности его изменения во времени.

В среде программирования MatLab реализована функция дискретного вейвлет-анализа [3]:

$$C(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}t - k) s(t) dt. \quad (1)$$

Здесь $C(j, k)$ — детализирующие коэффициенты для вейвлет-декомпозиции уровня k ; j — параметр масштаба; $a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}t - k)$ — вейвлет-функция, зависящая от вида вейвлета; a является значением масштаба; k определяет смещение во времени, при этом $a = 2^j$. Вычисление коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования требует гораздо меньше затрат, чем вычисление коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования [3].

Дискретный вейвлет-анализ отличается от непрерывного тем, что декомпозиция сигнала производится методом низкочастотной фильтрации. Исследуемый сигнал пропускается через ФНЧ с высоким значением частоты среза, где отсеивается высокочастотная помеха (это первый уровень декомпозиции). С каждым уровнем декомпозиции частота среза фильтра уменьшается. В итоге получается несколько так называемых деталей (то есть сигналы, отфильтрованные ФНЧ, высокочастотные компоненты) и одна аппроксимация. Число деталей зависит от числа уровней вейвлет-преобразования. Сложив все детали и аппроксимацию, мы получим исследуемый сигнал.

Возможности дискретного вейвлет-анализа в MatLab позволяют выявить неискаженную несущую синусоиду и рассчитать степень искажений, вносимых высокочастотными деталями, то есть можно установить новый коэффициент, который может стать альтернативой коэффициенту несинусоидальности. Рассмотрим это на следующем примере.

Смоделируем сигнал, представляющий собой сумму трех сигналов с частотами 50, 150 и 250 Гц соответственно. Сигнал с частотой 150 Гц имеет линейно нарастающую от 0 до 4 амплитуду (t изменяется от 0 до 0,8 с с шагом 0,0002 с):

$$y = 10 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 5 \cdot t \cdot \sin(2\pi \cdot 150 \cdot t) + 0,5 \cdot \sin(2\pi \cdot 250 \cdot t). \quad (2)$$

На рис. 1 представлен график изменения второй составляющей. На рис. 2 изображен график сигнала y .

Для начала проанализируем данный сигнал с помощью быстрого преобразования Фурье. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 54149-2010 будем производить анализ на каждых 0,2 с, то есть на десяти периодах, но без усреднения на 10 мин. Наш сигнал состоит из 40 периодов, то есть мы получим четыре спектра. Они представлены на рис. 3. Как видим, быстрое преобразование Фурье определяет, что амплитуда третьей гармоники нарастает со временем.

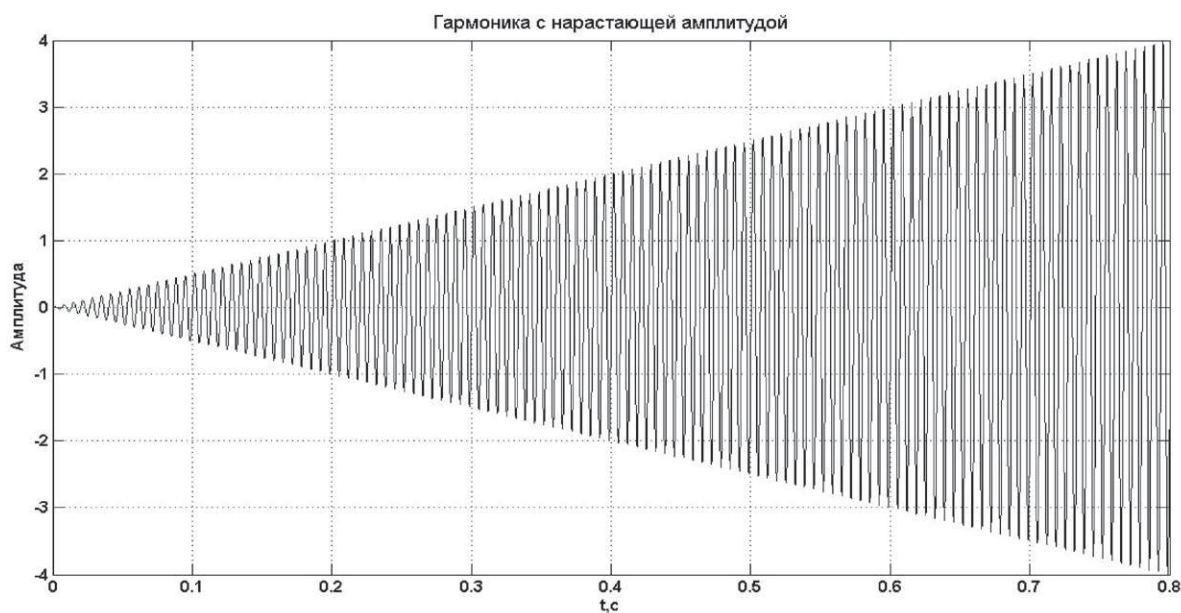


Рис. 1. Составляющая сигнала 150 Гц

Теперь проанализируем тот же сигнал с помощью вейвлет-преобразования. Используем вейвлет “dmeu” на пятом уровне разложения. На рис. 4 представлен результат анализа. Детали d1–d5 — это отфильтрованные высокочастотные составляющие, аппроксимация a5 — это очищенная от помех основная синусоида (детали d1–d2 на самом деле имеют почти нулевую амплитуду, на данном рисунке на оси ординат плохо видны множители на 10^{-4}).

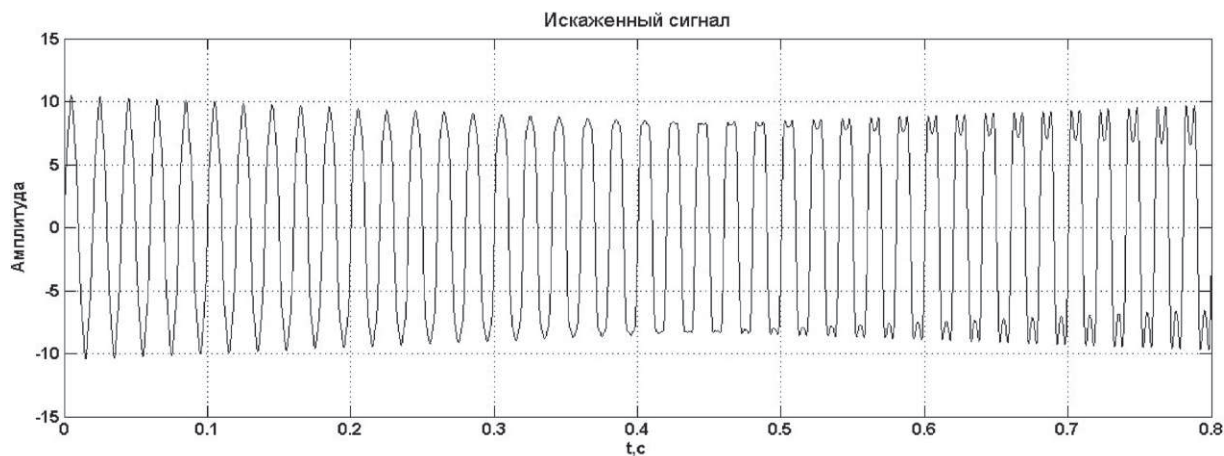


Рис. 2. Исследуемый сигнал

Рассчитаем теперь коэффициент несинусоидальности с помощью быстрого преобразования Фурье и коэффициент искажения с помощью вейвлет-анализа. Коэффициент искажений будем рассчитывать следующим образом. На каждом периоде основного сигнала, то есть на 0,02 с будем находить среднеквадратичное значение каждой детали и аппроксимации (с разрешением, равным 0,0002 с). Таким образом, коэффициент искажения будет определяться по следующей формуле:

$$Kd(n) = \frac{\sqrt[2]{(d5(n)^2 + d4(n)^2 + d3(n)^2 + d2(n)^2 + d1(n)^2)}}{a5(n)}. \quad (3)$$

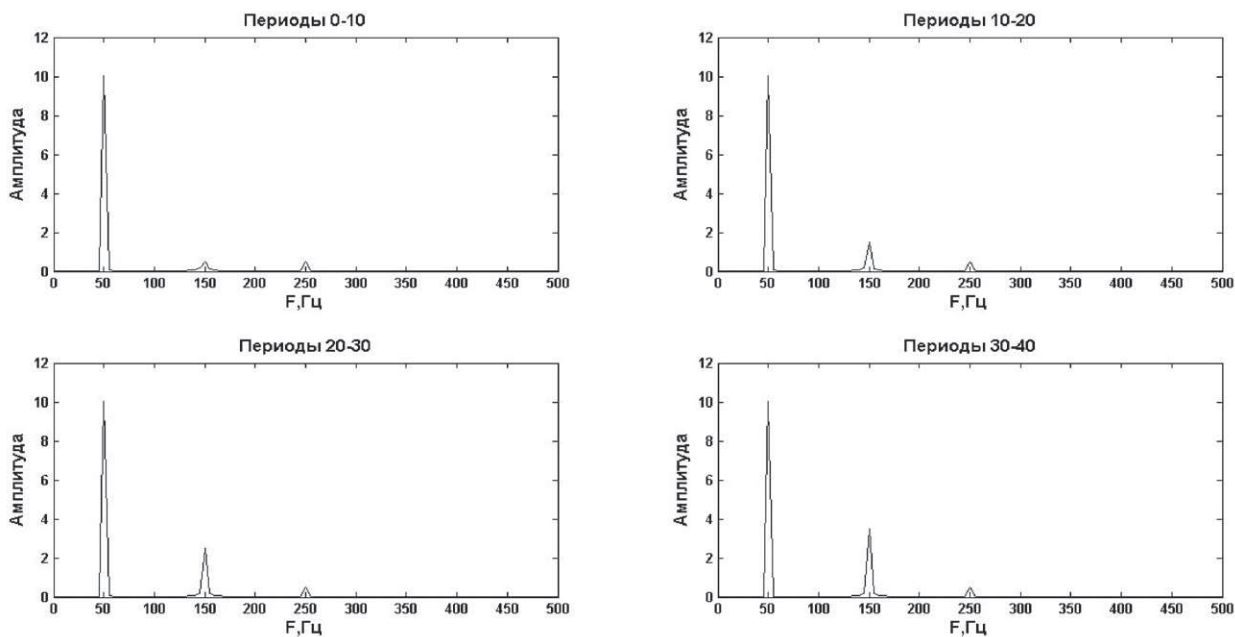


Рис. 3. Спектры для каждых 10 периодов

Здесь d_5-d_1 — среднеквадратичные значения для каждого периода n , a_5 — среднеквадратичное значение аппроксимации то есть чистой основной синусоиды, за каждый период n . Соответственно коэффициент искажения определяется с точностью 0,02 с, то есть для каждого периода. Построим графики изменения коэффициентов на одной оси координат.

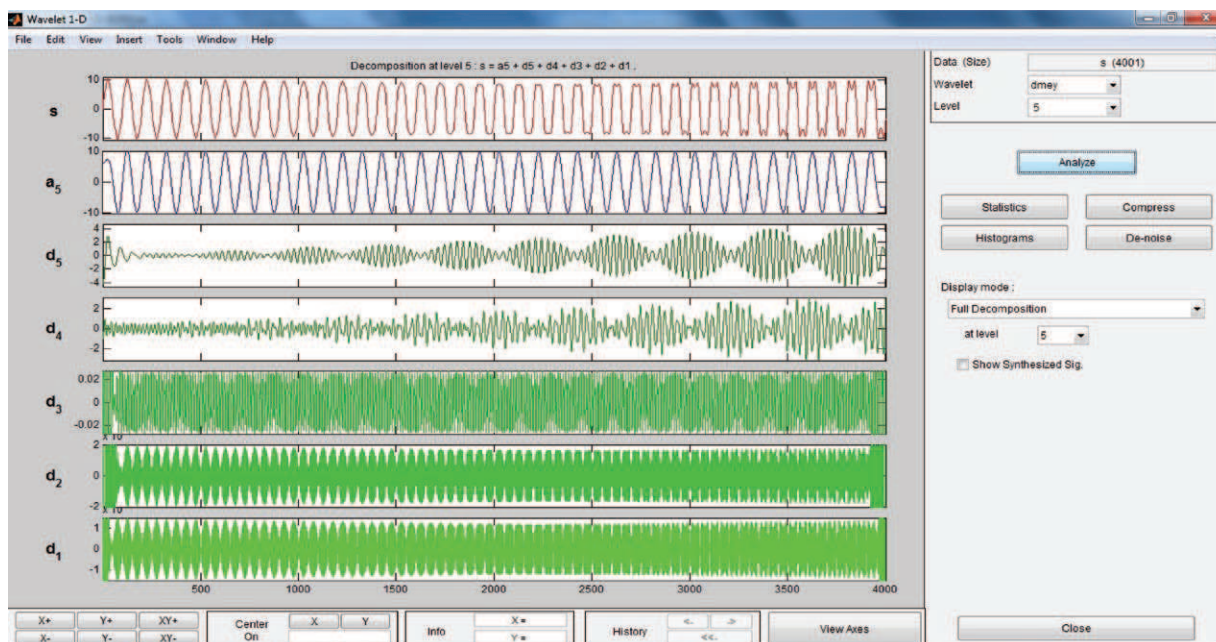


Рис. 4. Вейвлет-спектр исследуемого сигнала

Коэффициент искажения определяется с точностью до одного периода, а коэффициент не-синусоидальности лишь на 10 периодах. Соответственно при контроле несинусоидальности в режиме реального времени оператор скорее всего увидит картину, похожую на рис. 5. Здесь в момент времени, например между 0,1 и 0,2 с, преобразование Фурье не дает превышения допустимого зна-

чения несинусоидальности (10 %), в то время как вейвлет-анализ уже дает результат более 10 %. На рис. 6 можно проследить, что характер изменения во времени коэффициента несинусоидальности соответствует коэффициенту искажения, то есть оба они определяют то, что со временем искажения становится больше.

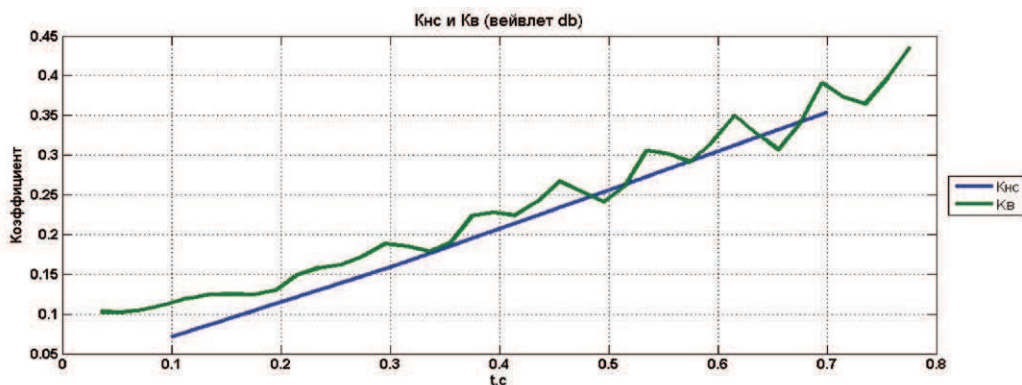


Рис. 5. Коэффициент несинусоидальности и коэффициент искажения

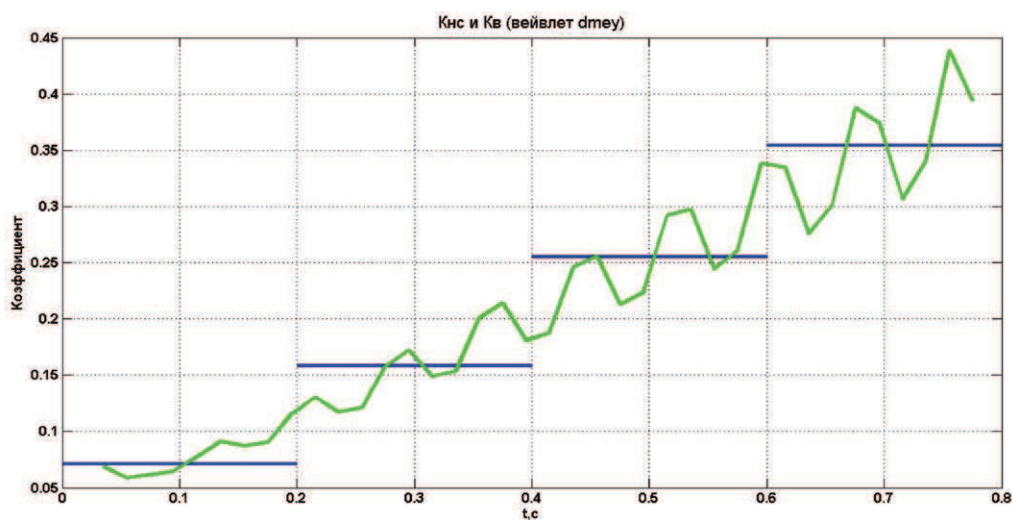


Рис. 6. Коэффициент несинусоидальности и коэффициент искажения

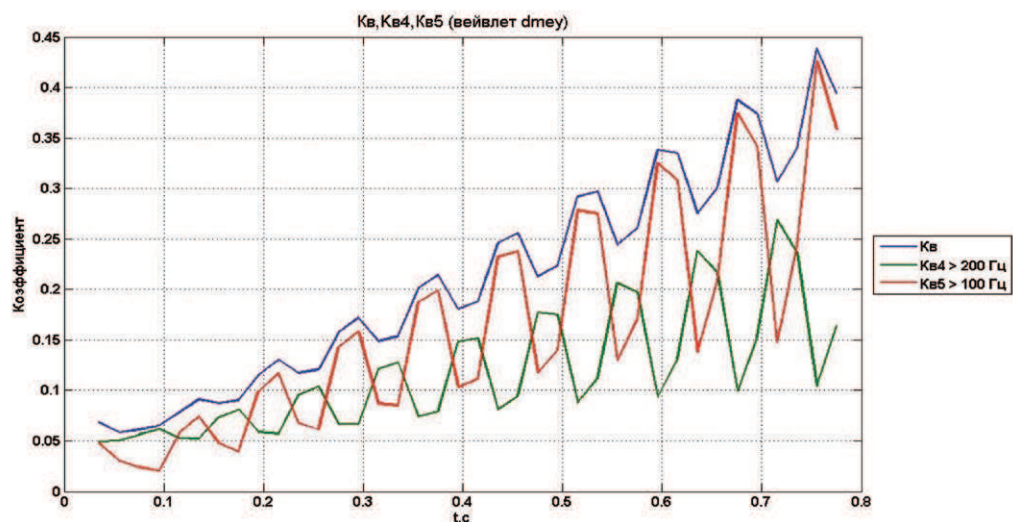


Рис. 7. Общий коэффициент искажения и коэффициенты для 5-й и 4-й деталей

Также возможно построить зависимости для каждой из деталей, чтобы проследить ее влияние на сигнал (рис. 7). На графике отсутствуют детали 1–3 ввиду своих малых амплитуд и практически нулевого влияния. Таким образом, можно отследить во времени изменение влияния каждой компоненты сигнала.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Преобразование Фурье имеет один серьезный недостаток — низкое разрешение по времени (см. ГОСТ 54149-2010). Предложенный в статье вариант вейвлет-анализа дает хорошее разрешение по времени (с точностью до одного периода несущего сигнала). При этом наблюдается одинаковый характер изменения коэффициентов искажений, полученных как с помощью разложения в ряды Фурье, так и с помощью вейвлет-анализа. Восстановление сигнала с помощью обратного дискретного вейвлет-преобразования может давать минимальную ошибку, которую можно не учитывать. В зависимости от сигнала и типа используемого вейвлета ошибка восстановления может достигать значения 10^{-12} [3]. В то время как ошибка при использовании обратного преобразования Фурье составляет примерно 0,1 [4]. На данный момент вейвлет-анализ не нашел практического применения для анализа качества электроэнергии. Почти все существующие приборы ориентированы на усреднения, установленные ГОСТом [4]. В них, как правило, используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Но приведенные в настоящей статье результаты свидетельствуют, что вполне возможна реализация программы для персонального компьютера или ноутбука, в которой с помощью дискретного вейвлет-анализа будет производиться обработка электрических сигналов, полученных с помощью осциллографа и представленных в табличной форме. Возможности среды MatLab позволяют написать *.exe файл такой программы. При этом анализ электрических сигналов можно выполнять в режиме реального времени.

Список литературы

1. ГОСТ 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Аббакумов А. А. Разработка методики и алгоритмов идентификации отклонений от нормативов параметров качества электроэнергии в системах электроснабжения: автореф. / А. А. Аббакумов. — Саранск, 2005.
3. Дьяконов В. П. MatLab 7.0. Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В. П. Дьяконов.
4. Анализ возможных способов контроля коэффициента несинусоидальности напряжения судовой силовой сети питания: отчет о НИР / Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — СПб., 2007.
5. Мищенко В. Ф. Перспективы применения вейвлет-преобразования для определения параметров качества электрической энергии СЭС / В. Ф. Мищенко, И. В. Сафронов // Эксплуатация морского транспорта. — СПб., 2013.