

## Методы комплексного анализа сигналов для тестирования радиоприёмной аппаратуры

А. В. Рыков, А. В. Луппов, В. Н. Поздин

*Рассмотрены методы оценки качества сигналов цифровой радиоприёмной аппаратуры и вопросы повышения надёжности аппаратуры за счёт расширения аппарата комплексного анализа сигналов при проведении её тестирования. Представлены методы и алгоритмы идентификации искажений выходных сигналов на основе аппарата вейвлет-анализа. Описана методика определения гармонического искажения сигнала при тестировании цифровой радиоприёмной аппаратуры, основанная на Фурье-преобразовании, показаны её недостатки в условиях анализа быстро изменяющихся сигналов. В качестве альтернативы предложена методика анализа нестационарных сигналов, основанная на вейвлет-преобразовании, а также введён новый критерий оценки гармонического искажения сигналов – коэффициент искаженности.*

*Ключевые слова:* вейвлет-преобразование, вейвлет-анализ, комплексное тестирование, радиоприёмная аппаратура, искажения сигналов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-95-102

### Введение

Современная цифровая радиоприёмная аппаратура обладает достаточно сложным устройством и включает в себя системы тактирования, синхронизации, самодиагностики, цифровой фильтрации и предварительной обработки аналоговых сигналов. Этот факт накладывает высокие требования к качеству и надёжности как цифровой, так и аналоговой частей для обеспечения заявленных паспортных характеристик.

Целью написания статьи является раскрытие методов оценки качества сигналов цифровой радиоприёмной аппаратуры.

В соответствии с целью, выделены задачи: осветить вопросы повышения надёжности аппаратуры за счёт расширения аппарата комплексного анализа сигналов при проведении её тестирования, представить методы и алгоритмы идентификации искажений выходных сигналов на основе аппарата вейвлет-анализа.

### Математическая постановка задачи

Одним из способов обеспечения высокой надёжности и качества аппаратных и программных средств является проведение комплексного тестирования выпускаемых устройств. В основе его лежат алгоритмы проведения циклических испытаний для анализа форм выходных сигналов, гармоник и чувствительности, основанных на различных моделях расчётов, при подаче на вход приёмников смеси сигналов с заданными параметрами.

Применение преобразования Фурье и его различных модификаций (быстрое преобразо-

---

**Рыков Александр Васильевич**<sup>1,2</sup>, инженер 2 кат., аспирант.

E-mail: alex.gykov90@gmail.com, usr11729@vyatsu.ru

**Луппов Андрей Вячеславович**<sup>1,2</sup>, инженер 2 кат., доцент, к.т.н.

**Поздин Владимир Николаевич**<sup>1,2</sup>, инженер 1 кат., доцент, к.т.н.

<sup>1</sup> АО НПП «Знак».

Россия, 610000, г. Киров, ул. Спасская, 30.

E-mail: vip@znak.kirov.ru

<sup>2</sup> Вятский государственный университет (ВятГУ).

Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

Статья поступила в редакцию 11 марта 2021 г.

---

© Рыков А. В., Луппов А. В., Поздин В. Н., 2021

вание, оконное преобразование Фурье и т. д.) является основой гармонического анализа при решении описанных задач. Однако, обработка сигналов таким способом имеет следующие недостатки:

- в процессе спектрального анализа нестационарных сигналов такие особенности сигнала как, например, пики или разрывы приводят к незначительным изменениям спектра, которые «растекаются» по всему интервалу частот, что делает их обнаружение практически невозможным;

- синусоидальные составляющие преобразования Фурье не могут отображать сигналы с «бесконечной» крутизной, это приводит к возникновению гармонических колебаний в указанных областях (эффект Гиббса);

- высокая сложность оценки местоположения и характера особенностей сигнала на временной шкале по составу гармоник спектра;

- невозможность анализа частотных характеристик сигнала в произвольные моменты времени.

Таким образом, для детального спектрально-временного анализа сигнала необходимо использовать метод, базисные функции которого имели бы локализацию не только в частотной области, как базисные функции преобразования Фурье, но и во временной. Такими свойствами обладают *вейвлет-функции* [1].

Аппарат вейвлетов – это математический инструмент, который в результате анализа позволяет выделить не только характерные частоты (масштабы), но также и координаты проявления данных частот на временной шкале. Поэтому вейвлет-анализ эффективен в задачах обработки нестационарных (во времени) и неоднородных (в пространстве) сигналов.

Общий принцип построения базиса вейвлет-преобразования состоит в использовании масштабного преобразования и смещений. Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $s(t)$  задается, по аналогии с преобразованием Фурье, путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле (с учетом области определения):

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Вейвлет-коэффициенты определяются интегральным значением скалярного произведения сигнала на вейвлет-функцию заданного вида.

### Методы оценки качества сигналов цифровой радиоприёмной аппаратуры

Для практического применения применяется дискретизация параметров сдвига и масштабирования  $b$  и  $a$ :

$$a = 2^j \text{ и } b = k2^j,$$

где  $j$  и  $k$  – целые числа, вследствие чего вейвлет-функция может быть задана следующим образом:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-1/2} \psi(a_0^{-j}t - k).$$

В результате этого представления прямое дискретное вейвлет-преобразование сводится к вычислению коэффициентов  $W(a, b)$  следующим образом:

$$W(j, k) = d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) a_0^{-1/2} \psi(a_0^{-j}t - k) dt,$$

где  $W(j, k) = d_{j,k}$  – детализирующие коэффициенты для вейвлет-декомпозиции сигнала уровня  $k$  (оба обозначения этих коэффициентов равноценны) [2].

Обратное дискретное вейвлет-преобразование (ОДВП) для непрерывных сигналов задается формулой:

$$s(t) = \frac{1}{C\psi} \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} W(j, k) a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j}t - k).$$

При дискретной вейвлет-декомпозиции сигнала до уровня  $n$  получается  $n$  последовательностей детализирующих коэффициентов  $d_n$ . Каждая последовательность представляет информацию о гармоническом содержании сигнала на соответствующем масштабе.

Основной задачей для использования данного метода является выбор оптимального анализирующего вейвлета для выделения интересующих локальных особенностей сигнала.

Опираясь на проведённый анализ свойств различных групп вейвлетов, представленный в работах [2, 3], сделаем выбор в

пользу группы ортогональных вейвлетов с компактным носителем. К ним относятся вейвлеты Добеши (dbN), Симплета (symN) и Койфлета (coifN).

Их основные свойства:

- анализ относится к ортогональному типу;
- функции имеют компактный носитель;
- вейвлеты обладают конечным числом нулевых моментов;
- возможны непрерывные преобразования и дискретные преобразования с применением быстрого вейвлет-преобразования;
- обеспечивается принципиальная возможность реконструкции сигналов и функций.

Свойства ортогональности заметно облегчают анализ, дают возможность реконструкции сигналов и позволяют реализовать алгоритмы быстрых вейвлет-преобразований для анализа искажений (особенностей) сигналов в реальном масштабе времени с гораздо меньшей временной задержкой, чем БПФ, и позволит снизить время обработки более, чем на порядок.

В качестве критериев выбора базисной вейвлет-функции из группы ортогональных вейвлетов с компактным носителем выделим следующие характеристики: **гладкость, размер носителя, число нулевых моментов**. Данные характеристики определяют способность вейвлета выявлять локальные особенности сигнала с определённым уровнем погрешности аппроксимации. [4–6].

Выбор вейвлета должен основываться на компромиссе между возможностями представления сигналов и объемом вычислений при преобразовании, а также ориентироваться на конкретные особенности сигнала [7, 8]. Поэтому, основываясь на рассмотренных теоретических аспектах, необходимо провести исследование в рамках поставленной задачи, сравнить вейвлеты из рассматриваемой группы и выявить наиболее подходящий.

В качестве основных критериев для сравнения вейвлетов выберем следующие:

- наиболее точное выделение высокочастотных составляющих сигнала и основной гармоники;
- минимальное количество уровней декомпозиции;
- наименьшая длина фильтра.

В соответствии с первым критерием, необходимо подобрать такой вейвлет, который позволит наиболее точно восстановить сигнал после прямого и обратного вейвлет-преобразования. Данное предположение основано на том, что, если сигнал точно восстанавливается после обратного преобразования, следовательно, прямое преобразование осуществляется без значительных потерь особенностей сигнала.

В качестве тестовой используем модель сигнала с высокочастотными искажениями неизменяемого уровня на всём его протяжении. Характеристики сигнала следующие:

- отношение частоты основной гармоники сигнала к частоте дискретизации – 0,05;
- количество периодов основной частоты – 8.

Фильтруя исходный сигнал  $S$  с помощью различных вейвлет-функций, будем находить для него среднеквадратичное отклонение от синусоидальной функции  $F$ , содержащей лишь основную гармонику соответствующего сигнала

$$\delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_W - F)^2},$$

где  $n$  – количество отсчетов исследуемого сигнала;  $S_W$  – сигнал, полученный в результате фильтрации тестового сигнала длительностью  $n$  отсчетов;  $F$  – сигнал, представляющий собой функцию синуса и соответствующий основной гармонике исследуемого тестового сигнала длительностью  $n$  отсчетов.

Точность выделения высокочастотных составляющих трудноформализуемая задача, поэтому в этом случае мы будем полагаться на свой опыт и результаты эмпирических наблюдений.

Для оценки вычислительных затрат на выполнение преобразования используем параметр количества операций  $N_{on}$ , требуемых для расчета одного коэффициента декомпозиции при вейвлет преобразовании до уровня  $i$ :

$$N_{on} = \sum_{k=1}^i m^{k-1} (2m - 1)$$

где  $m$  – длина вейвлет-фильтра;  $i$  – уровень декомпозиции.

Для удобства сравнения фильтров по приведенным выше критериям результаты сведены в таблице.

Таблица

## Сравнение характеристик вейвлет-фильтров

Тип вейвлет-фильтра	Среднеквадратичное отклонение для различного количества уровней декомпозиции, $\delta$			Длина вейвлет-фильтра, $m$	Кол-во нулевых моментов $\psi$ -функции	Количество операций для различного количества уровней декомпозиции, $N_{on}$		
	3 уровня	4 уровня	5 уровней			3 уровня	4 уровня	5 уровней
coif1	5,3E-2	1,8E-2	2,0E-3	6	2	473	2849	17105
coif2	5,3E-2	1,3E-3	1,3E-4	12	4	3611	43355	520283
coif3	5,3E-2	1,3E-4	9,3E-6	18	6	12005	216125	3890285
coif4	5,3E-2	1,6E-5	6,8E-6	24	8	28247	677975	16271447
coif5	5,3E-2	6,1E-6	5,1E-7	30	10	54929	1647929	49437929
db1	5,6E-2	8,3E-2	3,0E-4	2	1	21	45	93
db2	5,3E-2	1,9E-2	2,1E-3	4	2	147	595	2387
db3	5,3E-2	5,4E-3	1,6E-4	6	3	473	2849	17105
db4	5,3E-2	1,6E-3	1,3E-5	8	4	1095	8775	70215
db5	5,3E-2	5,1E-4	1,1E-5	10	5	2109	21109	211109
db6	5,3E-2	1,6E-4	1,0E-5	12	6	3611	43355	520283
db7	5,3E-2	5,8E-5	8,6E-6	14	7	5697	79785	1117017
db8	5,3E-2	2,2E-5	7,5E-6	16	8	8463	135439	2167055
db9	5,3E-2	1,0E-5	6,5E-6	18	9	12005	216125	3890285
db10	5,3E-2	6,9E-6	5,7E-6	20	10	16419	328419	6568419
sym2	5,3E-2	1,9E-2	2,1E-4	4	2	147	595	2387
sym3	5,3E-2	5,4E-3	1,6E-4	6	3	473	2849	17105
sym4	5,3E-2	1,6E-3	1,3E-4	8	4	1095	8775	70215
sym5	5,3E-2	5,1E-4	1,1E-5	10	5	2109	21109	211109
sym6	5,3E-2	1,6E-4	1,0E-5	12	6	3611	43355	520283
sym7	5,3E-2	5,8E-5	8,6E-6	14	7	5697	79785	1117017
sym8	5,3E-2	2,2E-5	7,5E-6	16	8	8463	135439	2167055
sym9	5,3E-2	1,0E-5	6,5E-6	18	9	12005	216125	3890285

В полученных результатах прослеживается следующая закономерность, а именно, чем больше длина фильтра, тем меньше значение СКО. Т. е. более длинный фильтр лучше восстанавливает сигнал, причем объясняется это формой АЧХ, более близкой к идеальной.

Такие параметры, как длина вейвлет-фильтра и количество уровней декомпозиции действительно, имеют важное значение и сильно влияют на скорость вычислений, эта особенность хорошо прослеживается в значениях количества операций  $N_{on}$ , требуемых для расчета одного коэффициента декомпозиции при вейвлет-преобразовании до уровня  $i$ . Также при увеличении длины фильтра увеличивает своё значение такой параметр как фазовый сдвиг, вносимый фильтром при преобразовании, а чем он меньше, тем быстрее реакция системы на какое-либо искажение сигнала.

Таким образом, необходимо найти компромисс – фильтр с наименьшей длиной и ко-

личеством уровней декомпозиции и достаточно небольшим значением СКО. Учитывая рассмотренные выше теоретические аспекты, результаты моделирования, а также результаты визуальной оценки способности фильтров к выделению высокочастотных составляющих, выбран вейвлет из семейства Добеши 5-го порядка до 4-го уровня декомпозиции.

Рассмотрим результаты анализа модельных сигналов с помощью преобразования Фурье и спектрограмму детализирующих коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования. Рисунок 1 представляет модель сигнала с комбинированными искажениями (высокочастотными искажениями на всём периоде, кратковременной высокочастотной помехой, временным снижением уровня сигнала и отсутствием сигнала). Все виды искажений напряжения легко определимы. В частности, более тёмные области коэффициентов D4 соответствуют уменьшению амплитуды основ-

ной гармонике (черные – отсутствию сигнала), вертикальные полосы, образованные коэффициентами D1–D3, свидетельствуют о наличии в сигнале длительных высокочастотных искажений, а более насыщенная область коэффициентов D1–D4 соответствует кратковременному высокочастотному искажению и фазовому скачку вследствие временного отсутствия сигнала. То есть, вейвлет-преобразование позволяет выделить и определить с высокой точностью различные искажения в любой ситуации.

Итак, вейвлет-декомпозиция преобразует сигнал в двумерную область, позволяя получить частотные компоненты и их расположение на временной оси одновременно. Причем полученные при анализе коэффициенты можно использовать при анализе параметров качества сигнала для выявления различных видов искажений.

Из определения вейвлет-преобразования имеем следствие: чем больше значения вейвлет-коэффициентов на данном масштабе

вейвлет-декомпозиции сигнала, тем больший вклад в анализируемый сигнал вносит соответствующая данному масштабу полоса частот. Таким образом, вейвлет-коэффициенты являются мерой искажения сигнала на данной полосе частот. Соответственно, величину искажения сигнала можно получить, находя среднеквадратичное значение каждой детали и аппроксимации [9]. Определим эту величину как коэффициент искажения:

$$K_{иск}(t) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2(t)}}{S_1},$$

где  $K_{иск}(t)$  – значения коэффициентов искажения,  $d_i(t)$  – значения коэффициентов декомпозиции сигнала до уровня  $n$ ,  $S_1$  – амплитуда 1-й гармоники. При этом мы получаем вектор значений  $K_{иск}$ , позволяющий нам судить о характере гармонического искажения сигнала в любой момент времени (рис. 2).

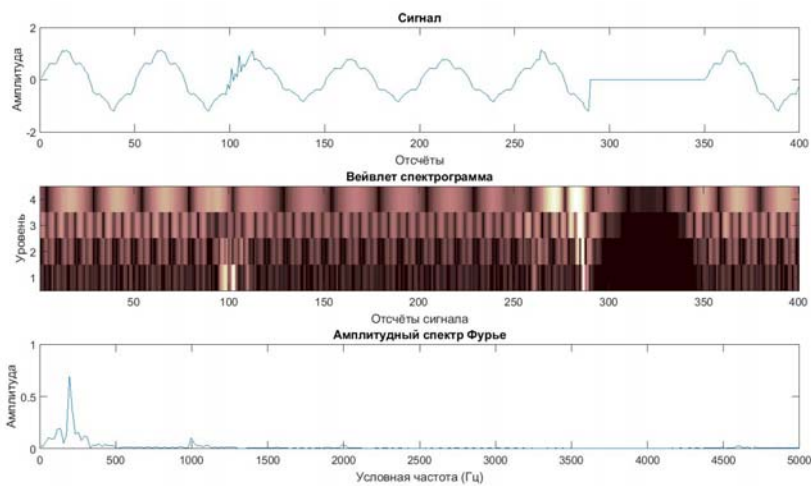


Рис. 1. Модель сигнала с комбинированными искажениями.

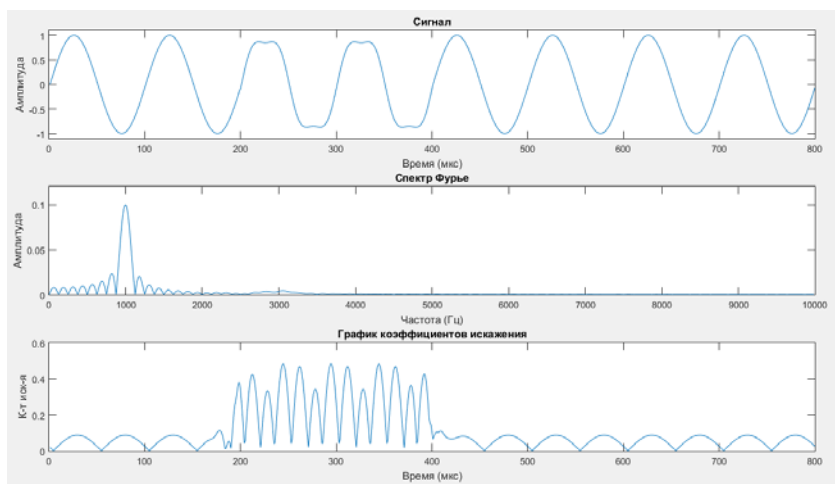


Рис. 2. Модель сигнала с временным искажением формы сигнала, ее Фурье-спектр и график коэффициентов искажения.

Значения коэффициента  $K_{иск}$ , определяемые по предлагаемой методике, коррелируют со значениями коэффициента несинусоидальности  $k_{нс}$ , определенного по традиционной методике при анализе стационарных сигналов, который представляет собой отношение действующего значения амплитуд составляющих гармоник (высших гармоник) к амплитуде основной частоты:

$$k_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n S_i^2}}{S_1} \times 100,$$

где  $S_i$  и  $S_1$  – амплитудные значения соответственно  $i$ -й и 1-й гармоник.

А зависимость коэффициента искаженности от значений коэффициента несинусоидальности, имеет линейный характер.

После проведения вейвлет-декомпозиции сигнала появляется возможность выполнить сжатие полученных данных путём отбрасывания несущественной части информации на различных масштабах с помощью процедуры квантования вейвлет-коэффициентов. При этом обратное преобразование (синтез) остается достаточно устойчивым и способно воспроизвести наиболее важные характеристики начального исследуемого сигнала, а так как чаще всего отбрасываемая часть сигнала является шумом, на данном этапе происходит фильтрация сигнала от шумовых помех. Это свойство вейвлет-преобразования может быть использовано в алгоритмах определения отклонения частоты и амплитуды основной гармоники сигнала при наличии высокочастотных гармонических искажений.

Рисунок 3 иллюстрирует алгоритм определения отклонения частоты и амплитуды основной гармоники сигнала. В результате дискретного вейвлет-преобразования искаженного сигнала на выходе блока формируются коэффициенты декомпозиции D1–D4, и коэффициенты аппроксимации A4, соответствующие основной гармонике сигнала. Для уменьшения влияния высших частот коэффициенты D1–D4 приравниваются к нулю и производится реконструкция сигнала. В этом случае, в результате восстановления на выходе может быть получена отфильтрованная основная гармоника.

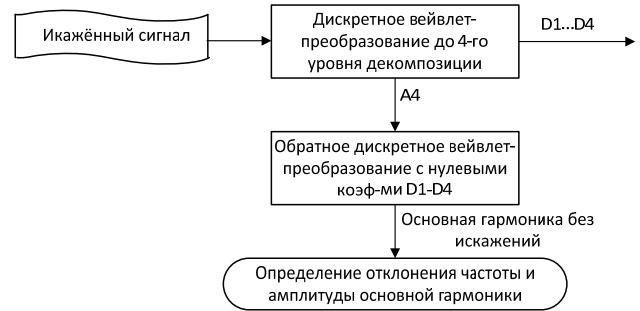


Рис. 3. Алгоритм определения отклонения частоты и амплитуды основной гармоники.

Объединяя описанные ранее методы можно сформировать общий алгоритм идентификации и классификации искажений сигналов с цифровой радиоприёмной аппаратуры на основе вейвлет-преобразования (рис. 4). Данный алгоритм рассчитан на обработку сигнала в реальном масштабе времени, т. е. идентификация ведётся с поступлением каждого нового отсчёта, однако распознавание определённых типов искажений запускается только в случае, если значение коэффициента искажения превысит заданное пороговое значение.

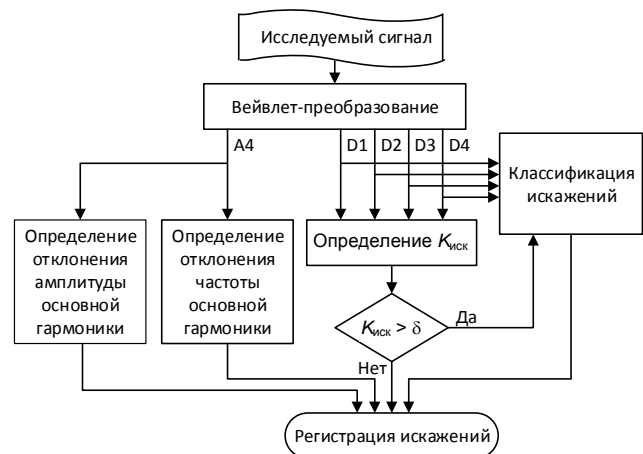


Рис. 4. Структура общего алгоритма идентификации и классификации искажений сигналов на основе вейвлет-преобразования.

## Заключение

В ходе работы была рассмотрена существующая методика определения гармонического искажения сигнала при тестировании цифровой радиоприёмной аппаратуры, основанная на Фурье-преобразовании. Показаны её недостатки в условиях анализа быстро изме-

няющихся сигналов. В качестве альтернативы была предложена методика анализа нестационарных сигналов, основанная на вейвлет-преобразовании, а также введён новый критерий оценки гармонического искажения сигналов – коэффициент искаженности. Предложенный алгоритм рассчитан на обработку сигнала в реальном масштабе времени, то есть идентификация ведётся с поступлением каждого нового отсчёта, однако распознавание определённых типов искажений запускается только в случае, если значение коэффициента искажения превысит заданное пороговое значение.

Для дальнейшего автоматического анализа коэффициентов искажения, полученных в результате вейвлет-преобразования, распознавания искажений и идентификации их вида могут использоваться два подхода: параметрический и непараметрический. Предпочтение надо отдать непараметрическому подходу, известному как искусственные нейронные сети, потому что он не требует какой-либо априорной информации о статистических распреде-

лениях и обладает высокой эффективностью в решении задач распознавания образов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gu I., Bollen M. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol. 15 (4). P. 1279.
2. Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В., Колкер А. Б. Фильтрации сигналов и изображений: фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad): монография. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010.
3. Шумарова О. С., Игнатъев С. А. // Вестник СГТУ. 2013. № 4 (73). С. 128.
4. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОМОН-Р, 2002.
5. Дремин И., Иванов О., Нечитайло В. // Успехи физических наук. 2001. № 5. С. 465.
6. Мандрикова О. В., Полозов Ю. А. // Информационные технологии. 2012. № 1. С. 31.
7. Mallat Stephane. A Wavelet tour of signal processing / пер. с англ. – М.: Мир, 2005.
8. Daubechies Ingrid. Ten Lectures on Wavelets / пер. с англ. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
9. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002.
10. Мищенко В. Ф., Сафронов И. В. // Эксплуатация морского транспорта. 2013. № 1 (71). С. 60.

PACS: 07.57.Pt

## Methods of complex signal analysis for testing radio receiving equipment

A. V. Rykov<sup>1,2</sup>, A. V. Luppov<sup>1,2</sup>, and V. N. Pozdin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> JSC NPP Sign

30 Spasskaya st., Kirov, 610000, Russia

<sup>2</sup> Vyatka State University

36, Moskovskaya st., Kirov, 610000, Russia

E-mail: alex.rykov90@gmail.com, usr11729@vyatsu.ru

Received March 11, 2021

*In this paper, we consider methods for evaluating the quality of signals from special purpose digital radio receivers. We talk about the issues of increasing the reliability of the equipment due to the expansion of methods for complex analysis of signals during testing. The article presents methods and algorithms for identifying distortions of signals based on the methods for wavelet analysis. Considered the existing technique for determining the harmonic distortion of a signal when testing digital radio-receiving equipment of a special purpose, based on the Fourier transform. Its shortcomings are shown in the analysis of rapidly changing signals. As an alternative, a technique for analyzing non-stationary signals based on wavelet transform was proposed, and a new criterion for estimating the harmonic distortion of signals, the distortion coefficient, was introduced.*

*Keywords:* wavelet transform, wavelet analysis, complex testing, radio receiving equipment, signal distortion.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-2-95-102

## REFERENCES

1. I. Gu and M. Bollen, *IEEE Transactions on Power Delivery* **15** (4), 1279 (2000).
2. I. Daubechies, *IEEE Trans. Inf. Theory* **36** (5), 961 (1990).
3. O. S. Shumarova, S. A. Ignat'ev, and E. M. Samoylova, *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University], No. 2, 192 (2014).
4. V. P. Diakonov, *Wavelets. From theory to practice* (SOLOMON-R, Moscow, 2002).
5. I. Dremin, O. Ivanov, and V. Nechitailo, *Phys. Usp.* No. 5, 465 (2001).
6. O. V. Mandrikova and Yu. A. Polozov, *Information technology*, No. 1, 31 (2012).
7. Stephane Mallarme, *A Wavelet tour of signal processing* (Mir, Moscow, 2005).
8. Ingrid Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets* / Translated from English (SIC "Regular and chaotic dynamics", Izhevsk, 2001).
9. V. P. Diakonov and I. V. Abramenkova, *MATLAB. Signal and image processing*. Special reference book. (Peter, St. Petersburg, 2002) [in Russian].
10. V. F. Mishchenko and I. V. Safronov, *Operation of marine transport*, No. 1 (71), 60 (2013).