

---

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**


---

УДК 621.317.757

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОСТИ СВЕРТОК ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ  
И ОТКЛИКОВ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

© 2007 г. Э. В. Семёнов, А. В. Семёнов

Поступила в редакцию 05.07.2005 г.

Проведено исследование нелинейности преобразования сигналов объектом путем последовательного воздействия на него двумя тестовыми сигналами и регистрации в качестве характеристики нелинейности разности сверток тестовых сигналов и сигналов-откликов объекта на тестовые сигналы. Показано, что для такого подхода заранее заданная взаимосвязь тестовых сигналов не требуется и возможно применение тестовых сигналов с наперед не заданной формой. Рассмотрен подход к учету нелинейных искажений сигналов приемником. На примере экспериментального исследования нелинейности преобразования металлическими объектами тестового воздействия на них переменными магнитными полями показано, что рассмотренная характеристика нелинейности в несколько раз превышает характеристику нелинейности преобразования сигнала, полученную посредством нахождения комбинационных спектральных составляющих.

**ВВЕДЕНИЕ**

В работе [1] были показаны преимущества использования многочастотного сигнала в нелинейной локации, что вызывает интерес к исследованию особенностей применения сверхширокополосных сигналов в качестве зондирующих для нелинейной локации. Однако при одновременном проявлении объектом нелинейных и реактивных свойств определенную проблему представляет выяснение того, что явилось причиной искажения формы сигнала объектом: линейное преобразование или совокупность линейного и нелинейного преобразований. Для осуществления метода [2], заключающегося в регистрации разности сигнала-отклика объекта и тестового сигнала, требуется, чтобы “эффективная ширина спектра испытательного сигнала не выходила за пределы горизонтальной части амплитудно-частотной характеристики испытываемого устройства”. В противном случае необходима компенсация линейных искажений объектом тестового сигнала, что реально может быть осуществлено только для стабильных во времени линейных искажений с простой частотной зависимостью. Для реализации методов определения статистических характеристик отклика объекта при воздействии на него случайного сигнала [3, 4] требуется длительное воздействие на объект. В рамках методов, при которых формируются локальные нули в спектре тестового сигнала [5–8], возможно наблюдение только небольшой части продуктов нелинейного преобразования в окрестностях нулей.

В работе [9] описан метод получения характеристики нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов со сплошным спектром (в том числе импульсных), претерпевающих линейные искажения, имеющие сложную частотную зависимость (в том числе изменяющиеся во времени). Метод заключается в последовательном воздействии на объект двумя тестовыми сигналами и регистрации разности отклика объекта на первый тестовый сигнал и линейно преобразованного отклика на второй тестовый сигнал. Практическому применению этого метода препятствует сложность генерации тестовых сигналов. Действительно, этот метод требует, чтобы второй тестовый сигнал являлся линейным преобразованием первого:

$$X_2(\omega) = K_1(\omega)X_1(\omega), \quad (1)$$

где  $X_1(\omega)$  и  $X_2(\omega)$  – спектры тестовых сигналов,  $K_1(\omega)$  – заданная функция. Создать генератор тестовых сигналов, осуществляющий преобразование (1) в точном соответствии с наперед заданной  $K_1(\omega)$ , затруднительно.

Помимо этого, при ограниченном  $|K_1(\omega)|$  все нули, которые имеет  $X_1(\omega)$ , будет иметь и  $X_2(\omega)$ . Это сужает возможности выбора тестовых сигналов.

Цель данной статьи – теоретическое и экспериментальное рассмотрение модификации метода [9], не требующей заданной взаимосвязи тестовых сигналов и учитывающей нелинейность приемника.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как и в методе, описанном в [9], осуществляем последовательное воздействие на объект двумя тестовыми сигналами  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ . В общем случае преобразование сигнала объектом описывается в виде

$$u(t) = S[x(t)],$$

где  $x(t)$  – тестовый сигнал,  $u(t)$  – отклик объекта на него,  $S$  – оператор, преобразующий временную функцию тестового сигнала во временную функцию отклика. Полагаем, что приемник является двухканальным, при этом первый (опорный) канал приемника регистрирует тестовые сигналы на выходе генератора, а второй (измерительный) – отклики объекта.

Характеристику нелинейности  $\varepsilon(t)$  преобразования сигналов объектом определим выражением

$$\varepsilon(t) = S_u[u_1(t)] * S_x[x_2(t)] - S_u[u_2(t)] * S_x[x_1(t)], \quad (2)$$

где  $S_u$  – нелинейный оператор измерительного канала, преобразующий временную функцию отклика объекта на входе измерительного канала приемника во временную функцию на его выходе,  $S_x$  – нелинейный оператор опорного канала,  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  – отклики объекта на сигналы  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  соответственно, \* – символ свертки.

## А. Линейный приемник

Сначала рассмотрим свойства характеристики нелинейности  $\varepsilon(t)$  в вырожденном случае, когда

$$\begin{aligned} S_x[x_{1,2}(t)] &= h_x(t) * x_{1,2}(t), \\ S_u[u_{1,2}(t)] &= h_u(t) * u_{1,2}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $h_x$  и  $h_u$  – импульсные характеристики опорного и измерительного каналов приемника соответственно (нелинейные искажения сигналов в каналах приемника в этом случае отсутствуют). При линейном преобразовании сигналов объектом и выполнении (3)  $\varepsilon(t) \equiv 0$ . Действительно, преобразование сигнала объектом линейно, если

$$u(t) = h(t) * x(t), \quad (4)$$

где  $h(t)$  – импульсная характеристика объекта, а знак равенства понимается как тождество относительно  $x(t)$ . Подставив (3) в (2), получим

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= h_u(t) * u_1(t) * h_x(t) * x_2(t) - \\ &- h_u(t) * u_2(t) * h_x(t) * x_1(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив (4) в правую часть (5), получим

$$\begin{aligned} &h_u(t) * u_1(t) * h_x(t) * x_2(t) - \\ &- h_u(t) * u_2(t) * h_x(t) * x_1(t) = \\ &= h_u(t) * h(t) * x_1(t) * h_x(t) * x_2(t) - \\ &- h_u(t) * h(t) * x_2(t) * h_x(t) * x_1(t), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &h_u(t) * h(t) * x_1(t) * h_x(t) * x_2(t) - \\ &- h_u(t) * h(t) * x_2(t) * h_x(t) * x_1(t) \equiv 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Если  $\varepsilon(t) \neq 0$  хотя бы для некоторых  $t$ , то преобразование сигналов объектом нелинейно, так как из  $\varepsilon(t) \neq 0$  следует невыполнение (6) (поскольку (5) и (7), очевидно, выполняются по-прежнему). Отсюда следует несправедливость подстановки

$$u_1(t) = h(t) * x_1(t), \quad (8)$$

$$u_2(t) = h(t) * x_2(t), \quad (9)$$

т.е. совместное выполнение (8) и (9) не имеет места. Следовательно, (4) не тождественно относительно  $x(t)$ . Поэтому преобразование сигналов в этом случае нелинейно.

Однако обратное утверждение неверно, т.е. нелинейное преобразование сигналов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  не гарантирует, что  $\varepsilon(t) \neq 0$ . Например, при  $x_1(t) = x_2(t)$  характеристика нелинейности  $\varepsilon(t)$  равна нулю и при нелинейном преобразовании этих сигналов. Поэтому, для того чтобы при нелинейном преобразовании сигналов  $\varepsilon(t)$  была отлична от нуля, следует выбирать сигналы  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  разной формы и/или амплитуды с тем, чтобы они различным образом подвергались изменению при нелинейном преобразовании.

С учетом изложенного практическое использование рассмотренного подхода заключается в следующем: если обнаружено, что  $\varepsilon(t) \neq 0$ , то делается вывод о том, что преобразование сигналов нелинейно.

Выполнение (1) в данном случае не требуется, что упрощает генерацию тестовых сигналов. При этом возможно применение тестовых сигналов с наперед не заданной формой (в частности, допустимы нелинейные искажения сигналов в генераторе). Это позволяет, например, при исследовании нелинейности преобразования сигналов в системах связи применять в качестве  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  отрывки передаваемых в этих системах реальных сигналов (в том числе с непересекающимися спектрами). Тестовые сигналы могут представлять собой реализации случайного процесса.

## Б. Нелинейный приемник

Рассмотрим случай, когда преобразование сигналов объектом линейно (в этом случае (8) и (9) выполняются совместно), но  $\varepsilon(t) \neq 0$ . Из совместного выполнения (8) и (9) следует выполнение (6) и (7). Поэтому  $\varepsilon(t) \neq 0$  означает невыполнение (5), полученного подстановкой (3) в (2). Поскольку (2) есть определение  $\varepsilon(t)$ , то, следовательно, не выполняется по крайней мере одно из равенств (3), т.е. присутствуют нелинейные искажения сигналов по крайней мере в одном из каналов приемника.

ка. При линейном  $S$ , т.е. при  $S[x(t)] = h(t) * x(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  характеризует только нелинейность преобразования сигналов приемником. Обозначим  $\varepsilon(t)$  для этого случая как  $\varepsilon_0(t)$ :

$$\varepsilon_0(t) = S_u[h(t) * x_1(t)] * S_x[x_2(t)] - S_u[h(t) * x_2(t)] * S_x[x_1(t)]. \quad (10)$$

Рассмотрим исследование нелинейности преобразования сигналов объектом в присутствии нелинейных искажений в каналах приемника. Заменяем исследуемый объект заведомо линейным объектом. Выберем импульсную характеристику  $h(t)$  этого линейного объекта так, чтобы он изменял форму и амплитуду одного из тестовых сигналов так же, как изменяет их исследуемый объект:

$$h(t) * x_1(t) = u_1(t) \text{ или } h(t) * x_2(t) = u_2(t), \quad (11)$$

где  $u_{1,2}$  – отклики исследуемого объекта. Если  $\varepsilon(t)$ , полученная для исследуемого объекта, хотя бы для некоторых  $t$  отличается от  $\varepsilon_0(t)$ , полученной при удовлетворяющей (11)  $h(t)$ , то преобразование сигналов исследуемым объектом нелинейно. Действительно, подставив в неравенство  $\varepsilon(t) \neq \varepsilon_0(t)$  формулы (2) и (10), получим

$$S_u[u_1(t)] * S_x[x_2(t)] - S_u[u_2(t)] * S_x[x_1(t)] \neq S_u[h(t) * x_1(t)] * S_x[x_2(t)] - S_u[h(t) * x_2(t)] * S_x[x_1(t)].$$

Из последнего неравенства следует, что совместное выполнение равенств (11) не имеет места, следовательно, уравнение  $h(t) * x(t) = u(t)$  не тождественно относительно  $x(t)$ . Таким образом, преобразование сигналов исследуемым объектом нелинейно.

На практике затруднительно подобрать линейный объект с импульсной характеристикой  $h(t)$ , в точности удовлетворяющей (11). Поэтому допустимо отыскать  $\varepsilon_0(t)$  для  $h(t)$ , удовлетворяющей условию  $h(t) * x_1(t) \approx u_1(t)$  или  $h(t) * x_2(t) \approx u_2(t)$ , если при отклонениях формы и амплитуды  $h(t) * x_1(t)$  от  $u_1(t)$  (или  $h(t) * x_2(t)$  от  $u_2(t)$ ) характеристика  $\varepsilon_0(t)$  изменяется незначительно (т.е. эти изменения не влияют на решение о сходстве или различии  $\varepsilon_0(t)$  и  $\varepsilon(t)$ ). Здесь под  $u_{1,2}$ , как и в (11), понимаются отклики исследуемого объекта.

*В. Сопоставление  $\varepsilon(t)$  с характеристиками нелинейности, полученными посредством нахождения комбинационных составляющих и гармоник*

Сопоставим  $\varepsilon(t)$  с характеристиками нелинейности преобразования сигнала объектом, полученными посредством нахождения в отклике объекта комбинационных спектральных составляющих и гармоник. Рассмотрим подход к такому сопоставлению, реализуемый, если в исследуемой области

частот  $|F\{S_x[x_2(t)]\}| > 0$ , где  $F$  – преобразование Фурье. Произведем свертку  $\varepsilon(t)$  с функцией

$$F^{-1}\left[\frac{1}{F\{S_x[x_2(t)]\}}\right],$$

где  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье, обозначив такую свертку  $\varepsilon^*(t)$ :

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon(t) * F^{-1}\left[\frac{1}{F\{S_x[x_2(t)]\}}\right].$$

Подставим (2) в последнюю формулу и после упрощения получим

$$\varepsilon^*(t) = S_u[u_1(t)] - F^{-1}\left[\frac{F\{S_u[u_2(t)]\}}{F\{S_x[x_2(t)]\}}\right] * S_x[x_1(t)]. \quad (12)$$

Сумму комбинационных составляющих и гармоник в отклике объекта  $u(t)$  на многочастотный тестовый сигнал  $x(t)$  можно интерпретировать как невязку  $u(t) - h(t) * x(t)$  уравнения (4), где  $h(t)$  – импульсная характеристика некоторого объекта, для которой  $F[h(t)] = U(\omega)/X(\omega)$  для всех  $\omega$ , на которых  $|X(\omega)| > 0$ . Здесь  $X(\omega)$  – спектр многочастотного тестового сигнала,  $U(\omega)$  – спектр отклика объекта на него<sup>1</sup>. Характеристику нелинейности (12) можно интерпретировать как невязку уравнения

$$S_u[u(t)] = F^{-1}\left[\frac{F\{S_u[u_2(t)]\}}{F\{S_x[x_2(t)]\}}\right] * S_x[x(t)], \quad (13)$$

полученную для  $u(t) = u_1(t)$  и  $x(t) = x_1(t)$ . Уравнение (13) идентично (4), если тестовому сигналу  $x(t)$  в (4) сопоставить зарегистрированный приемником тестовый сигнал  $S_x[x(t)]$ ,  $h(t)$  в (4) сопоставить

$$F^{-1}\left[\frac{F\{S_u[u_2(t)]\}}{F\{S_x[x_2(t)]\}}\right] \text{ и отклику объекта } u(t) \text{ в (4) со-}$$

поставить зарегистрированный приемником отклик объекта  $S_u[u(t)]$ . С этой точки зрения характеристика нелинейности (12) отличается от характеристик нелинейности, полученных посредством нахождения комбинационных составляющих и гармоник, только используемыми тестовыми сигналами и правилом выбора линейной аппроксимации нелинейного преобразования, что делает возможным сопоставление этих характеристик.

<sup>1</sup> При такой  $h(t)$  и при условии, что  $h(t)$  имеет ограниченный амплитудный спектр, спектр  $h(t) * x(t)$  совпадает со спектром отклика объекта  $u(t)$  на частотах многочастотного тестового сигнала  $x(t)$  и равен нулю на остальных частотах. Поэтому невязка  $u(t) - h(t) * x(t)$  представляет собой сумму гармоник и комбинационных составляющих в отклике объекта, имеющих частоты, отличающиеся от частот многочастотного тестового сигнала.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследована возможность использования рассмотренной характеристики нелинейности для получения дополнительных классификационных признаков металлических объектов. Данная характеристика сопоставлена с характеристикой нелинейности, полученной посредством нахождения комбинационных спектральных составляющих в отклике объекта на многочастотный тестовый сигнал (в [1] показаны преимущества использования для нелинейной локации многочастотного сигнала вместо одночастотного).

Экспериментальное устройство включало генератор, приемник, плоские передающую и приемную катушки диаметром 10 мм с числом витков 57 и 188 соответственно, расположенные в одной плоскости вплотную друг к другу (соприкасающиеся между собой). Сигнал с выхода генератора подавался на передающую катушку и на вход опорного канала приемника. В рабочем диапазоне частот передаточная функция системы “передающая катушка–приемная катушка” удовлетворительно аппроксимировалась функцией  $H(j\omega) = H_0 j\omega\tau / (1 + j\omega\tau)$  при  $\tau = 7.7$  мкс и  $H_0 = 0.22$ . Для компенсации сигнала, наводимого в приемной катушке передающей катушкой, на вход измерительного канала приемника подавалась разность выходного сигнала генератора, пропущенного через линейный пассивный фильтр с передаточной функцией  $H(j\omega)$ , и сигнала приемной катушки. Для определения характеристики нелинейности преобразования сигналов приемником компенсация наводки временно нарушалась посредством изменения передаточной функции фильтра таким образом, чтобы сигнал на входе измерительного канала приемника по амплитуде и форме приблизительно соответствовал отклику объекта.

В качестве тестового сигнала  $x_1(t)$  использовался сигнал вида

$$x_1(t) = \frac{\sin(2\pi f_b t)}{2\pi f_b t} - \frac{\sin(2\pi f_b t - \pi)}{2\pi f_b t - \pi},$$

где  $f_b = 24$  кГц – верхняя граничная частота спектра сигнала  $x_1(t)$ . Тестовый сигнал  $x_2(t)$  имел амплитудный спектр, идентичный амплитудному спектру  $x_1(t)$ , а его фазовый спектр отличался от фазового спектра сигнала  $x_1(t)$  на величину, квадратично зависящую от частоты:

$$X_2(\omega) = X_1(\omega)\exp(-jd_2\omega|\omega|),$$

где  $d_2$  – коэффициент [10], определяющий уменьшение амплитуды и увеличение длительности сигнала  $x_2(t)$  по сравнению с соответствующими параметрами  $x_1(t)$ . Было принято, что  $d_2 = 2.04 \times 10^{-6} \text{ с}^2$ . При этом амплитуда сигнала  $x_2(t)$  составляла 1.7%

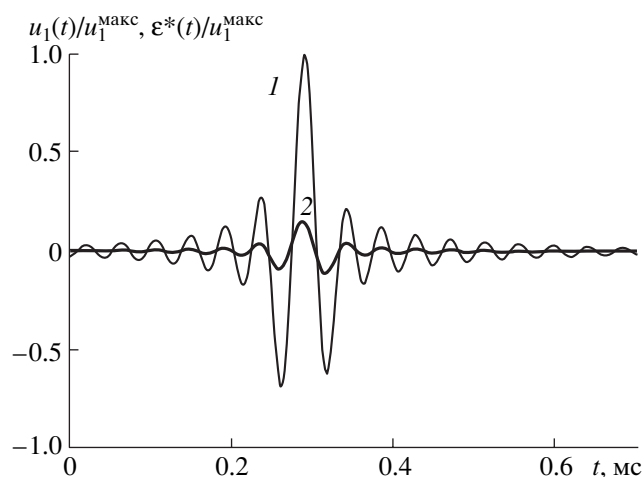


Рис. 1. Нормированные отклик  $u_1(t)$  (кривая 1) и характеристика нелинейности  $\epsilon^*(t)$  (кривая 2) объекта из низкоуглеродистой стали.

от амплитуды  $x_1(t)$ . Таким образом,  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  существенно отличались по амплитуде и форме. Максимальное напряжение импульса  $x_1(t)$  на передающей катушке, активное сопротивление которой было равно 6.3 Ом, составляло 28 В.

Для сопоставления рассмотренной характеристики нелинейности с характеристикой нелинейности, полученной посредством нахождения комбинационных составляющих, использовался двухчастотный тестовый сигнал (частоты 16 и 18 кГц) с амплитудой, равной амплитуде сигнала  $x_1(t)$ . Для достижения достаточного разрешения по частоте длительность двухчастотного сигнала необходимо было выбрать значительно больше длительности сигнала  $x_1(t)$ . Длительность двухчастотного сигнала на уровне 0.1 его амплитуды составляла 3.9 мс. Энергия двухчастотного сигнала была соответственно больше энергии  $x_1(t)$ .

В качестве модельных объектов были использованы диски диаметром 10 мм и толщиной 1 мм, выполненные из низкоуглеродистой стали и алюминия (поверхность объекта из алюминия была покрыта слоем окисла). Объект располагался над катушками на расстоянии 2.5 мм от их плоскости. На рис. 1 и 2 приведены отклик  $u_1(t)$  на тестовый сигнал  $x_1(t)$  и характеристика нелинейности  $\epsilon^*(t)$  объектов из низкоуглеродистой стали из алюминия. На обоих рисунках отклики объектов и характеристики нелинейности нормированы относительно амплитуды  $u_1^{\text{макс}}$  отклика  $u_1(t)$  объекта из низкоуглеродистой стали. Амплитуды откликов и характеристик нелинейности, приведенных на рисунках, представлены в таблице (амплитуды откликов объектов также нормированы относительно амплитуды отклика  $u_1(t)$  объекта из низко-

## Результаты экспериментальных исследований

Предмет исследования	Нормированная амплитуда, %		
	отклика $u_1(t)$	характеристики нелинейности $\epsilon^*(t)$	суммы комбинационных составляющих
Объект из низкоуглеродистой стали	100	15.8	2.2
Тестирование собственной нелинейности экспериментального устройства сигналом, близким к отклику объекта из низкоуглеродистой стали	101	0.09	0.04
Объект из алюминия	8.7	0.48	0.25
Тестирование собственной нелинейности экспериментального устройства сигналом, близким к отклику объекта из алюминия	9.4	0.46	0.23

углеродистой стали, а амплитуда характеристики нелинейности каждого из объектов нормирована относительно амплитуды отклика  $u_1(t)$  этого же объекта). В таблице также приведена амплитуда суммы комбинационных спектральных составляющих отклика каждого из объектов на двухчастотный тестовый сигнал (нормирована относительно амплитуды отклика этого же объекта на двухчастотный тестовый сигнал). Там же представлены результаты тестирования собственной нелинейности экспериментального устройства. Их нормирование выполнено аналогично нормированию приведенных в таблице откликов и характеристик нелинейности объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разность  $\epsilon(t)$  сверток тестовых сигналов и сигналов-откликов объекта на них характеризует

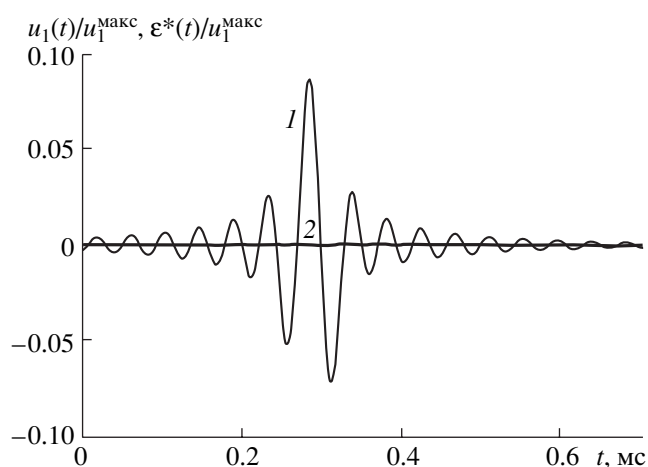


Рис. 2. Нормированные отклик  $u_1(t)$  (кривая 1) и характеристика нелинейности  $\epsilon^*(t)$  (кривая 2) объекта из алюминия.

нелинейность преобразования объектом широкополосных сигналов (в том числе при наличии линейных искажений сигналов объектом). Использование  $\epsilon(t)$  в качестве характеристики нелинейности преобразования сигналов позволяет применять тестовые сигналы с наперед не заданной формой (в частности, допустимы нелинейные искажения сигналов в генераторе).

При наличии нелинейных искажений в каналах приемника признаком нелинейности преобразования сигналов объектом является отличие  $\epsilon(t)$ , полученной для исследуемого объекта, от  $\epsilon(t)$ , полученной для заведомо линейного объекта, который изменяет форму и амплитуду одного из тестовых сигналов так же, как изменяет их исследуемый объект.

Экспериментально с применением рассмотренного метода показано, что преобразование сигналов объектом из низкоуглеродистой стали характеризуется значительной нелинейностью, в то время как признаки нелинейности преобразования сигналов объектом из алюминия практически отсутствуют. Поэтому рассмотренную характеристику нелинейности можно использовать для получения дополнительных классификационных признаков объекта.

При воздействии на объект из низкоуглеродистой стали двухчастотным тестовым сигналом с амплитудой, равной амплитуде  $x_1(t)$ , нормированная амплитуда суммы комбинационных спектральных составляющих отклика объекта составляла 2.2%. Это в семь раз меньше, чем нормированная амплитуда рассмотренной характеристики нелинейности  $\epsilon^*(t)$  для этого же объекта, притом что и сумма комбинационных составляющих, и  $\epsilon^*(t)$  допускают сходную интерпретацию в виде невязки линейного уравнения, аппроксимирующего нелинейное преобразование. Среди возможных причин

такого различия отметим то, что в характеристику нелинейности в виде совокупности комбинационных составляющих не включаются, в отличие от рассмотренного подхода, спектральные составляющие отклика объекта с частотами, совпадающими с частотами тестового сигнала. Резюмируя вышеприведенное, отметим практическое преимущество рассмотренного метода перед методом исследования нелинейности преобразования путем наблюдения за комбинационными составляющими.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант Президента Российской Федерации № МК-1702.2004.8).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р., Харин В.Б. // РЭ. 1998. Т. 43. № 1. С. 63.
2. Иванов И.Ф., Трофимов В.С. // Радиотехника. 1963. Т. 18. № 2. С. 52.
3. Хазен Э.М. // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Энергетика и автоматика. 1961. № 3. С. 58.
4. Дёч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов. М.: Сов. радио, 1965.
5. Семёнов Э.В. // Сб. докл. Всерос. науч. конф. "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике". Муром, 1–3 июля 2003. Муром: Изд-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2003. С. 99.
6. Семёнов Э.В. Способ исследования нелинейных свойств объекта: Патент РФ № 2227921. Б.И. 2004. № 12 (III ч.). С. 542.
7. Semyonov E.V. // AES 112th Convention Preprints. Munich, Germany, 10–13 May 2002. Preprint № 5621.
8. Lipshitz S.P., Vanderkooy J., Semyonov E.V. // AES 113th Convention Preprints. Los Angeles, California, USA, 5–8 October 2002. Preprint № 5664.
9. Семёнов Э.В. // Изв. Томск. политех. ун-та. 2004. Т. 307. № 4. С. 18.
10. Трифонов И.И. Расчет электронных цепей с заданными частотными характеристиками. М.: Радио и связь, 1988.