

*Запропонована методика ідентифікації неперервного каналу зв'язку на основі моделі Вольтерра в частотній області. Розглядаються програмно-апаратні засоби експериментального визначення АЧХ каналу першого та другого порядку із застосуванням тестових полігармонічних сигналів*

*Ключові слова: канали зв'язку, нелінійні динамічні системи, ідентифікація, ядра Вольтерра, багатомірні передаточні функції*

*Предлагается методика идентификации непрерывного канала связи на основе модели Вольтерра в частотной области. Рассматриваются программно-аппаратные средства экспериментального определения АЧХ канала первого и второго порядка с использованием тестовых полигармонических сигналов*

*Ключевые слова: каналы связи, нелинейные динамические системы, идентификация, ядра Вольтерра, многомерные передаточные функции*

*The methodology of identification of continuous communication channel on a basis of Volterra model in frequency domain has been proposed. The firmware of experimental determination of the channel's first and second orders amplitude-frequency characteristics (AFC) using test polyharmonic signals has been rated*

*Key words: communication channels, nonlinear dynamic systems, identification, Volterra kernels, multidimensional transfer function*

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С УЧЕТОМ ЕГО НЕЛИНЕЙНЫХ И ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ

**В. Д. Павленко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент

Кафедра компьютеризированных систем управления  
Одесский национальный политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044  
Контактный тел.: (048) 771-25-64, 063-461-74-72  
E-mail: pavlenko\_vitalij@mail.ru

**В. И. Ломовой**

Аспирант\*  
Контактный тел.: 063-461-74-72  
E-mail: lomovoy\_vi@ukr.net

**Исса Саид Ибрагим Мухаммад**

Аспирант\*  
Контактный тел.: 097-558-76-66  
E-mail: said\_alessa@yahoo.com  
\*Кафедра морской радиосвязи  
Одесская национальная морская академия  
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029

## Введение

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к системам связи, является верность передаваемой информации от источника сообщения к получателю. В практических условиях выполнению этого требования неизбежно препятствуют ошибки, которые вызываются: внешними помехами, поступающими на вход приемного устройства из канала связи (КС); внутренними шумами, возникающими в самом приемном устройстве; искажениями сигнала, связанными непосредственно с его прохождением по каналу. Для решения этой проблемы разрабатываются методы оптимального приема сигналов с учетом характеристик аппаратуры и КС [1]. От того, насколько эффективно используются потенциальные возможности системы связи, зависит целесообразность ее применения.

Широко используемые в настоящее время системы автоматической идентификации судов – АИС (Автоматическая Идентификационная Система; Automatic Identification System, AIS) используют множественный доступ с временным разделением каналов в УКВ полосе частот морской радиосвязи [2]. Надежность работы АИС в значительной степени зависит от состояния используемого КС [3]. Характеристики используемого КС могут с течением времени меняться. Эти изменения в целях сохранения помехозащищенности и пропускной способности КС необходимо отслеживать, что требует использования в передающей и приемной частях системы связи дополнительных методов и алгоритмов, основанных на передаче в перерывах между полезным сигналом тестовых (испытательных) сигналов и цифровой обработке получаемых откликов для восстановления информационной модели КС. Поэтому

му разработка средств, обеспечивающих проведение исследований в данной области, является актуальной задачей.

Строго говоря, современные непрерывные телекоммуникационные каналы являются нелинейными инерционными (динамическими) системами [4]. Для моделирования нелинейных динамических систем в настоящее время широко используются интегро-степенные ряды Вольтерра (РВ) [5 – 7]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ) и задача идентификации системы – построения модели в виде РВ заключается в определении многомерных ЯВ на основе данных экспериментальных исследований системы вход – выход.

Применение моделей в виде РВ для идентификации и моделирования КС обусловлено принципиально важными их достоинствами: инвариантностью относительно вида входного воздействия (т.е. возможностью решения задачи для детерминированных и случайных входных сигналов); явными соотношениями между входными и выходными переменными; универсальностью – возможностью исследования нелинейных непрерывных во времени и нелинейных импульсных систем, стационарных и нестационарных, с сосредоточенными и распределенными параметрами, стохастических систем, а также многомерных систем (систем со многими входами и многими выходами); возможностью проведения исследований как в аналитическом так и вычислительном планах; одновременным и компактным учетом нелинейных и инерционных свойств систем; интерпретируемостью линейных систем как подкласса нелинейных, что позволяет распространять на нелинейные системы хорошо разработанные в теории линейных систем временные и спектральные методы, оперировать понятиями многомерных весовых и передаточных функций, амплитудно- и фазо-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ).

Построение модели нелинейной динамической системы в виде РВ заключается в выборе формы тестовых воздействий и разработке алгоритма, который позволял бы по измеренным реакциям определять ЯВ или их Фурье-изображения (многомерные АЧХ и ФЧХ) соответственно для моделирования КС во временной или частотной области [7].

**Целью** данной работы является идентификация непрерывного КС в виде РВ в частотной области – определение его многочастотных характеристик на основе данных эксперимента вход-выход с использованием тестовых полигармонических сигналов.

**Модели Вольтерра во временной и частотной области.** В общем случае соотношение типа вход-выход для нелинейной динамической системы может быть представлено интегро-степенным рядом Вольтерра вида [5 – 7]:

$$y[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} y_n[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} \int \dots \int_0^{\infty} w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \tag{1}$$

где  $x(t)$  та  $y[x(t)]$  – соответственно входной и выходной сигналы системы;  $w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  – импульсная

переходная функция или ЯВ  $n$ -го порядка;  $y_n[x(t)]$  –  $n$ -ая парциальная составляющая отклика системы.

На практике заменяют РВ полиномом и обычно ограничиваются несколькими первыми членами ряда. Идентификация нелинейной динамической системы в виде РВ состоит в определении  $n$ -мерных импульсных переходных функций  $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$  или их Фурье-образов  $W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$  –  $n$ -мерных передаточных функции (ПФ), соответственно для моделирования системы во временной или частотной области.

Многомерное ( $n$ -мерное) преобразование Фурье для ЯВ  $n$ -го порядка (1) записывается в виде:

$$W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n) = F_n \langle w_n(t_1, t_2, \dots, t_n) \rangle = \int \dots \int_{-\infty}^{+\infty} w_n(t_1, t_2, \dots, t_n) \exp\left(-j \sum_{i=1}^n \omega_i t_i\right) \prod_{i=1}^n dt_i, \tag{2}$$

где  $F_n \langle \rangle$  –  $n$ -мерное преобразование Фурье;  $j$  – мнимая единица. Тогда модель нелинейной системы на основе РВ в частотной области можно представить в виде:

$$y[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} F_n^{-1} \left\langle W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n X(j\omega_i) \right\rangle_{t=t_1=t_2=\dots=t_n},$$

где  $F_n^{-1} \langle \rangle$  – обратное  $n$ -мерное преобразование Фурье;  $X(j\omega_i)$  – Фурье-изображение входного сигнала.

Идентификация нелинейной системы в частотной области сводится к определению на заданных частотах значений модуля и фазы многомерной ПФ – многомерных АЧХ  $|W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)|$  и ФЧХ  $\arg W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)$ , которые определяются по формулам:

$$|W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)| = \sqrt{[\operatorname{Re}(W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n))]^2 + [\operatorname{Im}(W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n))]^2},$$

$$\arg W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n) = \arctg \frac{\operatorname{Im}(W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n))}{\operatorname{Re}(W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n))},$$

где  $\operatorname{Re}$  и  $\operatorname{Im}$  – соответственно вещественная и мнимая части комплексной функции  $n$ -переменных.

*Аппроксимационный метод идентификации систем в виде моделей Вольтерра в частотной области.* При идентификации ЯВ  $n$ -го порядка ( $n > 1$ ) существенное влияние на точность оказывают соседние члены РВ. Поэтому необходимо применять специальные приемы [7], позволяющие минимизировать это влияние. Идея такого приема заключается в конструировании из реакций системы на  $N$  ( $N \geq n$ ) тестовых входных сигналов с заданными амплитудами такого выражения, которое было бы с определенной точностью (с точностью до отброшенных членов порядка  $N+1$  и выше) равно  $n$ -му члену РВ:

$$y_n[x(t)] = \sum_{j=1}^N c_j y[a_j x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sum_{j=1}^N c_j a_j^n \right) \int \dots \int w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \tag{3}$$

где  $a_j$  – амплитуды тестовых сигналов, произвольные отличные от нуля и попарно различные числа;  $c_j$  – вещественные коэффициенты, которые выбираются так, чтобы в правой части (3) обращались в нуль все первые  $N$  членов, кроме  $n$ -го, а множитель при  $n$ -кратном интеграле стал равным единице. Это условие приводит к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $c_1, c_2, \dots, c_N$ :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N c_j \cdot a_j^n = \delta_k^n = \begin{cases} 1, & n = k; \\ 0, & n \neq k; \end{cases} \end{cases}, \quad 345 \quad 1 \leq k \leq N. \quad (4)$$

Эта система всегда имеет решение, причем единственное, так как определитель системы только множителем  $a_1 a_2 \dots a_N$  отличается от определителя Вандермонда. Таким образом, при любых вещественных числах  $a_j$ , отличающихся от нуля и попарно различных, можно найти такие числа  $c_j$ , при которых линейная комбинация (3) из реакций системы равняется  $n$ -му члену РВ с точностью до отброшенных членов ряда.

Выражения (3), можно построить бесчисленным множеством способов, беря различные числа  $a_1, a_2, \dots, a_N$  и определяя по ним из (4) коэффициенты  $c_1, c_2, \dots, c_N$ .

Выбор амплитуд  $a_j$  должен обеспечивать сходимость ряда (1) и минимум погрешности при выделении парциальной составляющей  $y_n[x(t)]$  в соответствии с (3), определяемой остатком ряда (1) – членами степени  $N+1$  и выше. Если  $x(t)$  – тестовое воздействие максимально допустимой амплитуды, при котором ряд (1) сходится, то амплитуды  $a_j$  должны быть по модулю не больше единицы:  $|a_j| \leq 1$  для  $\forall j=1, 2, \dots, n$ .

В [8, 9] показано, что предложенные для использования в аппроксимационном методе идентификации амплитуды тестовых полигармонических сигналов [7] не являясь оптимальными, и обосновывается выбор амплитуд тестовых воздействий, обеспечивающих минимальную погрешность оценки многомерных ПФ (многомерных АЧХ и ФЧХ) идентифицируемой системы.

Для идентификации в частотной области применяются тестовые полигармонические воздействия, представляющие собой сигналы вида

$$x(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

где  $n$  – порядок оцениваемой ПФ;  $A_k, \omega_k$  и  $\varphi_k$  – соответственно амплитуда, частота и фаза  $k$ -ой гармоники. В исследованиях полагаем амплитуды  $A_k$  одинаковыми, а фазы  $\varphi_k$  равными нулю. При этом тестовый сигнал можно записать в комплексной форме:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sum_{k=1}^n \cos(\omega_k t) = \\ &= \frac{A}{2} \sum_{k=1}^n (e^{j\omega_k t} + e^{-j\omega_k t}) = \frac{A}{2} \left( \sum_{k=1}^n e^{j\omega_k t} + \sum_{k=1}^n e^{-j\omega_k t} \right). \end{aligned}$$

Тогда  $n$ -ую парциальную составляющую в отклике системы можно записать в виде:

$$\begin{aligned} y_n(t) &= \frac{A^n}{2^n} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} C_n^m \underbrace{\sum_{k_1=1}^n \dots \sum_{k_n=1}^n}_{n} e^{j \left( \sum_{l=1}^m \omega_{k_l} - \sum_{r=m+1}^n \omega_{k_r} \right) t} \left| W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n}) \right| \times \\ &\times \cos \left( \left( -\sum_{l=0}^m \omega_{k_l} + \sum_{l=m+1}^n \omega_{k_l} \right) t + \arg W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n}) \right), \quad (5) \end{aligned}$$

здесь  $[\ ]$  обозначает функцию выделения целой части числа.

Из отклика на тестовый сигнал (5) выделяется составляющая с частотой  $\omega_1 + \dots + \omega_n$ :

$$A_n |W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)| \cos[(\omega_1 + \dots + \omega_n)t + \arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)].$$

На основе анализа выражения (5) установлено, что при определении многомерных ПФ нелинейных систем необходимо учитывать ограничения, накладываемые на выбор частот тестового полигармонического сигнала, которые обеспечивают неравенство комбинационных частот в гармониках выходного сигнала (5) [10].

В [10] доказана теорема о выборе тестовых частот, согласно которой для однозначности фильтрации из  $n$ -ой парциальной составляющей отклика идентифицируемой системы гармоники с комбинационной частотой  $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$  необходимо и достаточно, чтобы она не равнялась другим комбинационным частотам вида  $c_1 \omega_1 + c_2 \omega_2 + \dots + c_n \omega_n$ , при этом коэффициенты  $c_i$  – целые числа ( $i=1, 2, \dots, n$ ), удовлетворяют условиям: мощность множества  $c_i < 0$  принимает значения от 0 до  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ ;  $\sum_{i=1}^n |c_i| \leq n$ ;  $n - \sum_{i=1}^n |c_i| = 2p$ ,  $p \in \mathbf{N}$ ;  $N$  – множество натуральных чисел.

Вследствие таких ограничений на выбор частот тестовых полигармонических сигналов, значения ПФ в этих “выколотых” точках многомерного пространства частот могут быть получены только с помощью интерполирования. При практической реализации метода идентификации нелинейной системы необходимо минимизировать число таких точек неопределенности на интервале построения многомерных ПФ, т.е. обеспечить минимум ограничений на выбор частот тестового сигнала. Предложенное условие выбора частот [10], определяющих возможность однозначной фильтрации искомой гармоники, позволяет максимально расширить множество допустимых тестовых частот. Так, при определении ПФ второго порядка требуется обеспечить между частотами входного сигнала выполнение не пяти, как в [7], а трёх неравенств:  $\omega_1 \neq 0$ ,  $\omega_2 \neq 0$  и  $\omega_1 \neq \omega_2$ . При определении ПФ третьего порядка потребуется обеспечить между частотами входного сигнала выполнение 15-ти неравенств (вместо 45-ти – в [7]):  $\omega_1 \neq 0$ ,  $\omega_2 \neq 0$ ,  $\omega_3 \neq 0$ ,  $\omega_1 \neq \omega_2$ ,  $\omega_1 \neq \omega_3$ ,  $\omega_2 \neq \omega_3$ ,  $2\omega_1 \neq \omega_2 + \omega_3$ ,  $2\omega_2 \neq \omega_1 + \omega_3$ ,  $2\omega_3 \neq \omega_1 + \omega_2$ ,  $2\omega_1 \neq \omega_2 - \omega_3$ ,  $2\omega_2 \neq \omega_1 - \omega_3$ ,  $2\omega_3 \neq \omega_1 - \omega_2$ ,  $2\omega_1 \neq -\omega_2 + \omega_3$ ,  $2\omega_2 \neq -\omega_1 + \omega_3$  и  $2\omega_3 \neq -\omega_1 + \omega_2$ .

*Методика и программно-аппаратные средства идентификации радиочастотного КС.* Выполнены экспериментальные исследования КС УКВ диапазона с целью идентификации его многочастотных характеристик, характеризующих нелинейные и динамические свойства канала. Использована модель Вольтерра в виде полинома второй степени. При этом физические свойства КС характеризуются передаточными функ-

циями  $W_1(j\omega)$  и  $W_2(j\omega_1, j\omega_2)$  – Фурье–образами весовых функций  $w_1(t)$  и  $w_2(t_1, t_2)$ .

Реализация метода идентификации на базе компьютера IBM PC осуществлялась с помощью разработанного программного обеспечения на языке C++ с использованием классов CWaveRecorder, CWavePlayer, CWaveReader, CWaveWriter, которые позволяют обеспечить более удобное взаимодействие с MMAPI Windows. Программные средства позволяют автоматизировать процесс формирования тестовых сигналов с заданными параметрами (амплитудами и частотами). Позволяют также передавать и принимать сигналы через выходной и входной тракт звуковой карты компьютера, производить сегментацию файла откликов на фрагменты, соответствующие реакциям исследуемого КС на тестовые полигармонические воздействия с различной амплитудой.

В экспериментальных исследованиях использовались две идентичные УКВ–радиостанции фирмы SOUTHBELL (диапазон рабочих частот 30 300 МГц) и компьютер IBM PC со звуковой платой Realteck High Definition Audio. Последовательно определялись АЧХ первого и второго порядков. Применялся метод идентификации с порядком аппроксимации  $N=4$ . Структурные схемы процедуры идентификации – определения АЧХ первого и второго порядков КС, представлены соответственно на рис. 1 и рис. 2. Общая схема программно–аппаратного комплекса идентификации КС на основе данных эксперимента вход–выход представлена на рис. 3.

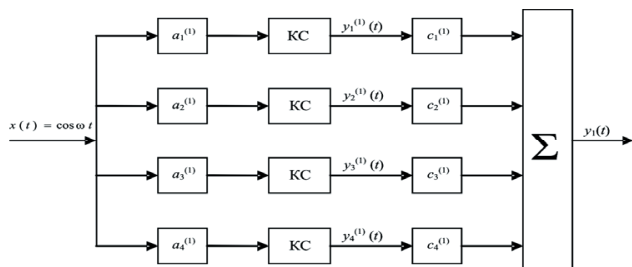


Рис. 1. Структурная схема процедуры идентификации АЧХ первого порядка

Принятые отклики КС на тестовые сигналы (рис. 4) составляют группу сигналов, количество которых равно используемому порядку аппроксимации  $N$  ( $N=4$ ). В каждой следующей группе частота сигналов увеличивается на величину выбранного шага. При формировании тестовых сигналов использованы амплитуды и соответствующие им коэффициенты, приведенные в [9].

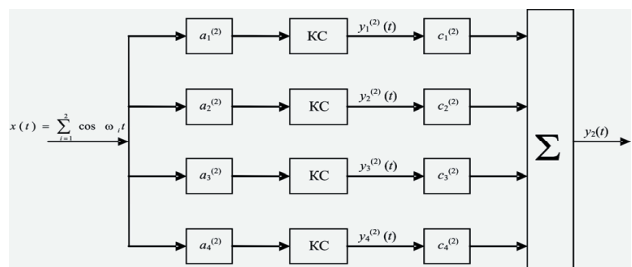


Рис. 2. Структурная схема процедуры идентификации АЧХ 2-го порядка

Максимальная допустимая амплитуда в экспериментальных исследованиях КС с использованием звуковой карты равнялась 0,677 В (определена на основе эксперимента). Используемый диапазон частот определялся полосой пропускания звуковой карты, а частоты тестовых сигналов выбирались из этого диапазона с учетом указанных выше ограничений. В эксперименте выбраны: начальная частота – 200 Гц; конечная частота – 1600 Гц; шаг изменения частоты – 27 Гц; при определении АЧХ второго порядка смещение по частоте  $\omega_2 - \omega_1$  равно 25, 50 и 100 Гц.

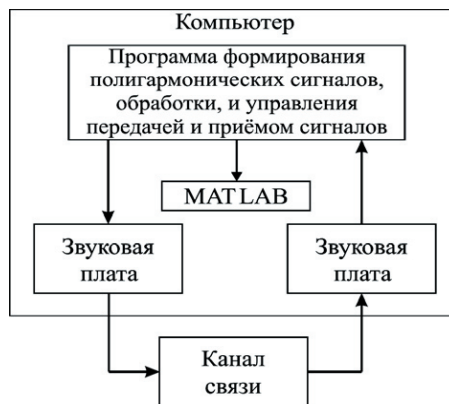


Рис. 3. Общая схема эксперимента

Из принятых сигналов–откликов каждой группы формируется взвешенная сумма (рис. 1 и 2). В результате получаем парциальные составляющие отклика КС  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ . Для каждой парциальной составляющей отклика находится преобразование Фурье (используется БПФ) и из полученных спектров выделяются только информативные гармоники, амплитуды которых представляет собой значения искомых характеристик АЧХ первого и второго порядков. АЧХ первого порядка  $|W_1(j\omega)|$  получаем, выделяя в спектре парциального отклика КС  $y_1(t)$  гармонику с частотой  $\omega$ . АЧХ второго порядка  $|W_2(j\omega_1, j\omega_2)|$  получим, выделив из спектра парциальной составляющей отклика КС  $y_2(t)$  на тестовый сигнал  $A\cos\omega_1 t + A\cos\omega_2 t$  гармонику с суммарной частотой  $\omega_1 + \omega_2$ .

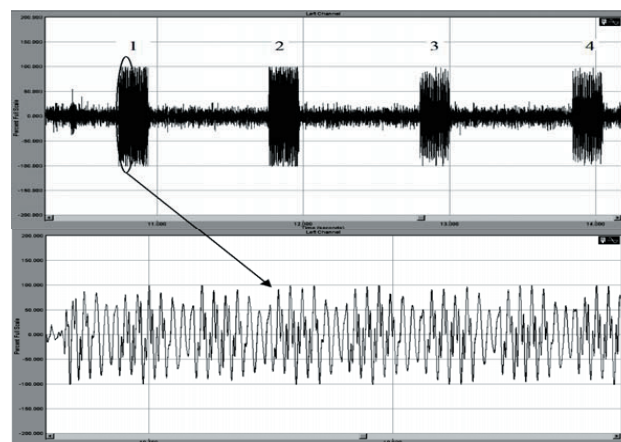


Рис. 4. Принятая группа сигналов – откликов, соответствующих амплитудам тестовых сигналов: 1 –  $a = -1$ ; 2 –  $a = 1$ ; 3 –  $a = -0,644$ ; 4 –  $a = 0,644$

Полученные в результате цифровой обработки данных экспериментов по определению АЧХ первого и второго порядков после процедуры сглаживания представлены на рис. 5 – 8.

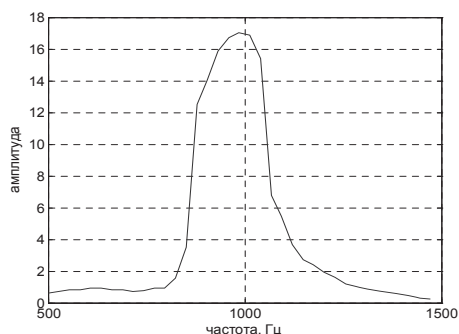


Рис. 5. АЧХ первого порядка после сглаживания

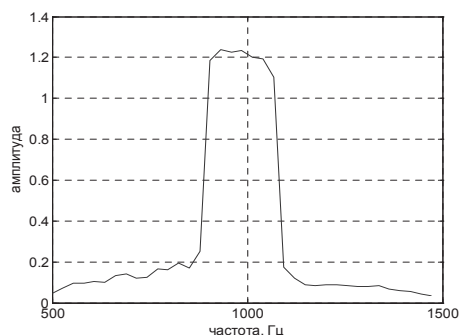


Рис. 6. Поддиагональное сечение АЧХ второго порядка после сглаживания при  $\Delta\Omega=25$  Гц

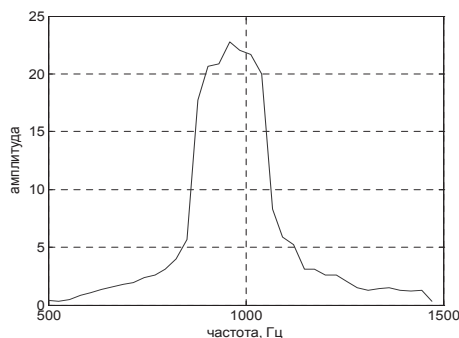


Рис. 7. Поддиагональное сечение АЧХ второго порядка после сглаживания при  $\Delta\Omega=50$  Гц

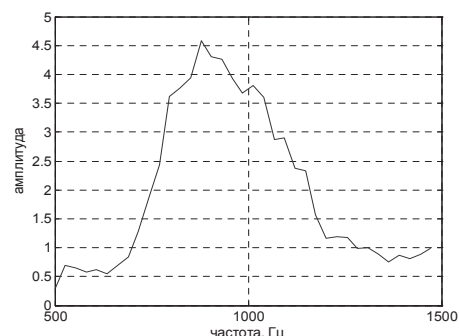


Рис. 8. Поддиагональное сечение АЧХ второго порядка после сглаживания при  $\Delta\Omega=100$  Гц

## Выводы

Разработана методика экспериментальных исследований непрерывного канала связи телекоммуникационной системы для идентификации его характеристик с учетом нелинейных и динамических свойств на основе моделей в виде рядов Вольтерра в частотной области. Методика основана на применении аппроксимационного метода идентификации нелинейной динамической системы с помощью составления линейных комбинаций откликов системы на входные полигармонические сигналы различной амплитуды.

Разработаны программно-аппаратные средства, реализующие методику идентификации, которые применяются для построения информационной модели непрерывного канала связи в виде АЧХ первого и второго порядков на основе данных эксперимента вход-выход с использованием соответственно тестовых гармонических и бигармонических сигналов.

Полученные результаты исследований демонстрируют существенную нелинейность КС, что приводит к искажениям сигналов в радиотракте, снижает важные показатели телекоммуникационной системы: точность воспроизведения сигналов, разрешающую и пропускную способность, помехозащищенность.

В дальнейших исследованиях полученные частотные характеристики КС будут использованы для синтеза компенсаторов нелинейных искажений в телекоммуникационной системе.

## Литература

1. Giannakis, G.B. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering / G.B. Giannakis, E. Serpedin // Signal Processing – EURASIP, Elsevier Science B.V. – 2001. – Vol. 81. – № 3. – P. 533–580.
2. Кошевой, В.М. Система и устройства автоматической идентификации судов. Учебное пособие / В.М. Кошевой, А.В. Шишкин, В.И. Купровский – Одесса: ОНМА, 2005. – 116 с.
3. Рекомендация МСЭ-РМ.1371-1. Технические характеристики универсальной судовой автоматической идентификационной системы (АИС), использующей множественный доступ с временным разделением в УКВ полосе частот морской подвижной службы. – 2001. – 27 с.
4. Осадчий, С.І. Ідентифікація динаміки радіорелейного каналу передачі даних / С.І. Осадчий, О.А. Саула // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць НАУ. – Київ, 2004. – Вип. 11. – с. 157–160.
5. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: учеб. для вузов. В 5 т. / К.А. Пупков, Н.Д. Егунов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – Т. 2. – 638 с.
6. Doyle, F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, D.A. Ogunnaike – Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. – 314 p.

7. Данилов, Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
8. Павленко, В.Д. Исследование аппроксимационного метода идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра в частотной области / В.Д. Павленко, В.И. Ломовой, Саид И.М. Исса // Интелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій: матеріали науково-практичної конференції ISDMIT'2007, 15–18 травня 2007, Євпаторія, Крим: збірник наукових праць у 3–х томах. – Херсон, 2007. – Том 3. – С. 165 – 168.
9. Павленко, В.Д. Идентификация каналов связи на основе модели Вольтерра в частотной области / В.Д. Павленко, В.И. Ломовой, Саид И.М. Исса // Автоматика–2008: доклады XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23–26 вересня 2008 р., Одеса. В 3–х т. – Одеса: ОНМА, 2008. – Т. 3. – С. 14 – 17.
10. Павленко В.Д., Исса С.И.М. Ограничения выбора частот тестовых полигармонических сигналов для идентификации нелинейной системы / В.Д. Павленко, С.И.М. Исса // Труды Одесск. политехн. ун–та. – 2009. – Вып. 1 (31). – Одесса: ОПУ. – С. 107 – 113.

*Дана робота присвячена аналізу існуючих методів тестування інтерфейсів, розглядаються особливості тестування інтерфейсів мобільних пристроїв. Застосування принципів юзабиліти дозволило запропонувати варіант поліпшення діючого інтерфейсу радіотелефону*

*Ключові слова: евристики, тестування, якість інтерфейсу*

*Данная работа посвящена анализу существующих методов тестирования интерфейсов, рассматриваются особенности тестирования интерфейсов мобильных устройств. Применение принципов юзабилити позволило предложить вариант улучшения интерфейса действующего радиотелефона*

*Ключевые слова: эвристики, тестирование, качество интерфейса*

*The analysis of existing interface evaluation methods and features of mobile devices interface were carried out. Testing with users helped to find out problems in interface of cordless phone. The interface improvements were elaborated by using heuristics*

*Keywords: heuristics, usability testing, interface evaluation*

УДК 519.7

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

**Р.В. Мельникова**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра программного обеспечения электронно-  
вычислительных машин  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
пр. Ленина 14. г. Харьков, 61166  
Контактный тел.: (057) 70-21-446, 702-13-50  
E-mail: melnikova@kture.kharkov.ua

### 1. Постановка проблемы

Основная цель разработчиков интерфейсов – спроектировать его так, чтобы пользователю было легко и удобно его использовать. Для этого проводятся различного рода тестирования – с привлечением поль-

зователей или без них. Юзабилити-тестированием является любой эксперимент, направленный на измерение качества интерфейса или же поиск конкретных проблем в нем. Тестирование позволяет:

- понять насколько плохо или хорошо работает интерфейс, как можно его улучшить;