ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

УДК 681.5.015.52

В.Д. Павленко, канд. техн. наук., ст. науч. сотр.,
В.А. Сперанский, специалист,
Одес. нац. политехн. ун-т

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КАНАЛА СВЯЗИ НА ОСНОВЕ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

В.Д. Павленко, В.О. Сперанський. **Побудова моделі каналу зв'язку на основі рядів Вольтерра в частотній області.** Запропоновано методику експериментальних досліджень каналу зв'язку телекомунікаційної системи для ідентифікації його характеристик з урахуванням нелінійних і динамічних властивостей на основі рядів Вольтерра в частотній області. Методика заснована на застосуванні апроксимаційного методу ідентифікації нелінійної динамічної системи за допомогою складання лінійних комбінацій відгуків системи на вхідні полігармонічні сигнали різних амплітуд. Розроблено програмно-апаратні засоби ідентифікації, які застосовуються для побудови інформаційної моделі каналу зв'язки у вигляді амплітудно-частотних характеристик першого й другого порядку.
Ключові слова: ідентифікація, нелінійні системи, ряди Вольтерра, канал зв'язку, частотні характеристики.

В.Д. Павленко, В.А. Сперанский. **Построение модели канала связи на основе рядов Вольтерра в частотной области.** Предложена методика экспериментальных исследований канала связи телекоммуникационной системы для идентификации его характеристик с учетом нелинейных и динамических свойств на основе 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 различных амплитуд. Разработанные программно-аппаратные средства идентификации применяются для построения информационной модели канала связи в виде амплитудно-частотных характеристик первого и второго порядка.
Ключевые слова: идентификация, нелинейные системы, ряды Вольтерра, канал связи, частотные характеристики.

V.D. Pavlenko, V.A. Speranskyy. **Communication channel model construction in the frequency domain based on Volterra series.** The effective technique for the experimental research of the continuous communication channel of a telecommunication system for identification of the amplitude-frequency characteristics (AFC) on the basis of Volterra series is offered. The technique is based on the application of the approximating method of identifying the nonlinear dynamic system by means of compiling the linear combinations of responses of researched system to the test polyharmonic signals with different amplitudes. The developed hardware-software tools implementing the technique of identification are applied to create an information model of the communication channel in the form of the first- and second-order amplitude-frequency characteristics.
Keywords: identification, nonlinear systems, Volterra series, communication channel, frequency characteristics.

Создание новых и усовершенствование эксплуатируемых телекоммуникационных систем (ТКС) требует разработки новых эффективных методов и инструментальных программных средств измерения их параметров и характеристик, автоматизации процедур диагностического контроля и прогнозирования их технического состояния. Интенсивно развивается направление, связанное с разработкой методов оптимального приема сигналов с учетом характеристик аппаратуры и канала связи (КС). Высокая скорость передачи данных в современных ТКС достигается за счет различных приемов, среди которых учет характеристик КС.

Строго говоря, в современных ТКС КС являются нелинейными инерционными стохастическими системами. Поскольку при эксплуатации у КС, как динамического объекта, в зависимости от конструкции и условий работы характеристики изменяются во времени, то возникает необходимость в постоянном уточнении математической модели КС — многократном решении задачи идентификации [1, 2].

Для идентификации динамики радиорелейного канала передачи данных используются линейные динамические модели в виде АЧХ и ФЧХ, не позволяющие оценить нелинейные динамические искажения КС [1]. Это не дает возможности решить задачу синтеза компенсаторов нелинейных искажений в ТКС, повысить точность воспроизведения сигналов на приемной стороне и пропускную способность КС.

Для моделирования нелинейных динамических систем (НДС) широко используются интегро-степенные ряды Вольтерра (РВ) [3…5]. 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 $x(t)$, 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).

Известен аппроксимационный метод идентификации НДС на основе модели в виде РВ с помощью составления линейных комбинаций откликов системы на тестовые полигармонические сигналы различных амплитуд [4, 6]. Однако, не существует методики экспериментальных исследований КС в частотной области, реализующей данный метод идентификации.

Предлагается методика и программно-аппаратные средства экспериментального определения многомерных АЧХ и ФЧХ КС на основе аппроксимационного метода идентификации НДС в виде РВ в частотной области с использованием стандартных аппаратных средств IBM PC, а так же построение модели радиоканала УКВ–диапазона.

В общем случае соотношение ”вход — выход” для НДС при нулевых начальных условиях может быть представлено интегро-степенным рядом Вольтерра [3]

$$y[x(t)]=\sum_{n=1}^{\infty}y_n[x(t)]=\int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau+\int_0^t\int_0^t w_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2+$$
$$+\int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3+\ldots, \qquad (1)$$

где $x(t)$ и $y[x(t)]$ — соответственно входной и выходной сигналы системы;

$w_n(\tau_1,\tau_2,...,\tau_n)$ — весовая функция или ЯВ n-го порядка;

$y_n[x(t)]$ — n-я парциальная составляющая (ПС) отклика системы;

t — текущее время.

Многомерная передаточная функция (ПФ) — n-мерное преобразование Фурье ЯВ n–го порядка (1) [3]

$$W_n(j\omega_1,...,j\omega_n)=F_n\left\langle w_n(t_1,...,t_n)\right\rangle=\int_{-\infty}^{+\infty}\!\!\ldots\!\int w_n(t_1,...,t_n)\exp-\left(j\sum_{l=1}^{n}\omega_i t_i\right)\prod_{l=1}^{n}dt_i\,,$$

где j — мнимая единица.

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

Идентификация НДС в частотной области сводится к определению значений модуля и фазы многомерной ПФ на задаваемых частотах — многомерных АЧХ и ФЧХ, соответственно

$$\left|W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n)\right| = \sqrt{[\mathrm{Re}(W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n))]^2 + [\mathrm{Im}(W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n))]^2},$$
$$\arg W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n) = \mathrm{arctg}\frac{\mathrm{Im}(W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n))}{\mathrm{Re}(W_n(j\omega_1,\ \ldots,j\omega_n))}, \qquad (2)$$

где Re и Im — соответственно вещественная и мнимая части комплексной функции n-переменных.

В аппроксимационном методе идентификации формируется линейная комбинация откликов НДС на N ($N \geq n$) тестовых входных сигналов $x(t)$ с заданными амплитудами, которая с точностью до отброшенных членов порядка N+1 и выше равна n-му члену РВ,

$$y_n[x(t)] = \sum_{i=1}^{N} c_i y[a_i x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty}\left(\sum_{i=1}^{N} c_i a_i^n\right)\int_{-\infty}^{\infty}\!\!\ldots\!\int w_n(\tau_1,\tau_2,\ldots\tau_n)\prod_{l=1}^{n} x(t-\tau_l)\,d\tau_l\,, \qquad (3)$$

где a_i — амплитуды тестовых сигналов; произвольные, отличные от нуля и попарно различные числа;

c_i — вещественные коэффициенты, выбранные так, что в правой части (3) обращаются в нуль первые N членов ряда, кроме n-го, а множитель при n-кратном интеграле равен единице. Это условие приводит к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов c_1, c_2,…, c_N:

$$\left\{\sum_{i=1}^{N} c_i\ a_i^n = \delta_k^n = \begin{cases}1, & k = n;\\ 0, & k \neq n;\end{cases}\right. \quad \text{где}\ k = 1,\ 2,\ldots,N. \qquad (4)$$

Система (4) всегда имеет решение, причем единственное, т.к. её определитель только множителем $a_1 a_2 \ldots a_N$ отличается от определителя Вандермонда [4]. Таким образом, при любых вещественных a_i, отличающихся от нуля и попарно различных, можно найти такие числа c_i, при которых линейная комбинация из откликов системы (3) равняется n-му члену РВ с точностью до отброшенных членов ряда $n>N$. Выражения (3) можно построить бесчисленным множеством способов, задавая различные числа a_1, a_2, …, a_N и определяя по ним из (4) коэффициенты c_1,c_2,…,c_N.

Для идентификации НДС в частотной области применяются тестовые полигармонические воздействия — сигналы вида

$$x(t) = \sum_{l=1}^{n} A_l \cos(\omega_l t + \varphi_l), \qquad (5)$$

где n — порядок оцениваемой ПФ;

A_l, ω_l и φ_l — соответственно амплитуда, частота и фаза k-й гармоники; в исследованиях полагаем все амплитуды $A_l = A$, а фазы $\varphi_l = 0$.

Из отклика $y(t)$ на входной тестовый сигнал $x(t)$ (4) выделяется составляющая с частотой ω_1+...+ω_n [4]

$$A^n\left|W_n(j\omega_1,\ldots,j\omega_n)\right|\cos[(\omega_1+\ldots+\omega_n)t + \arg W_n(j\omega_1,\ldots,j\omega_n)]. \qquad (6)$$

Выполнены экспериментальные исследования КС УКВ диапазона для построения его модели в виде РВ. Использована модель в виде полинома второй степени. При этом физические свойства КС характеризуются передаточными функциями $W_1(j2\pi f)$ и $W_2(j2\pi f_1, j2\pi f_2)$ — Фурье–образами весовых функций $w_1(t)$ и $w_2(t_1, t_2)$.

Метод идентификации реализован на базе компьютера IBM PC с помощью разработанного программного обеспечения на языке C++ с использованием классов CWaveRecorder, CWave-

Player, CWaveReader, CWaveWriter, позволяющих обеспечить достаточно удобное взаимодействие с Multimedia API Windows. Программные средства позволяют: автоматизировать процесс формирования тестовых сигналов с заданными параметрами — амплитудами и частотами; 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 различными амплитудами.

Структурная схема программно-аппаратного комплекса идентификации КС на основе данных эксперимента “вход — выход” представлена на рис. 1.

Канал связи организован с использованием двух идентичных УКВ-радиостанций S.P.RADIO A/S, RT2048VHF с диапазоном рабочих частот 154,4…163,75 МГц и компьютера IBM PC со звуковыми платами Creative SBLive!. При идентификации КС по массивам значений откликов на основе обработки экспериментальных данных (3) последовательно определялись АЧХ первого и второго порядков. Использовался метод идентификации с помощью аппроксимационной модели порядка N=4. Структурная схема идентификации КС в частотной области представлена на рис. 2.

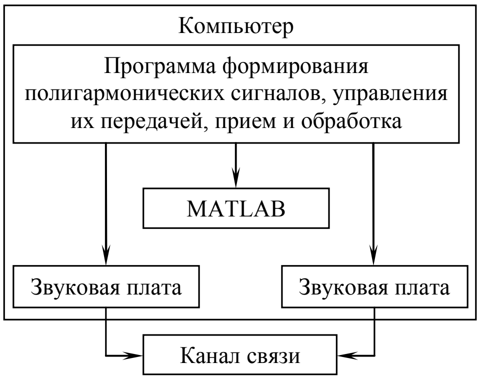


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса идентификации КС на основе данных эксперимента “вход — выход”

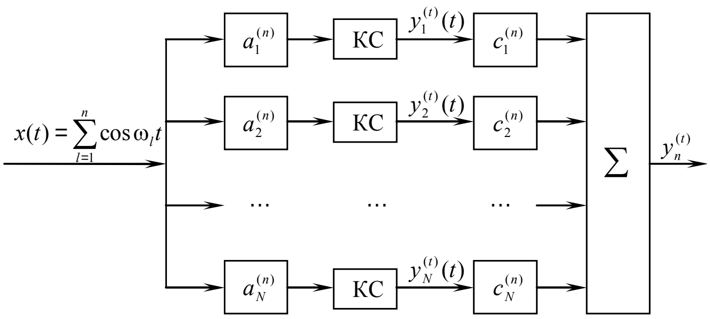


Рис. 2. Структурная схема идентификации КС в частотной области

Принятые отклики КС $y[a_i x(t)]$ на тестовые сигналы $x(t)$ составляют последовательную группу сигналов $y_N^{(n)}(t)$, количество которых совпадает с используемым порядком аппроксимации N (в данном эксперименте N=4) (рис. 3). В каждой следующей группе частота сигналов увеличивается на величину выбранного шага. При формировании тестовых сигналов использованы амплитуды и соответствующие им коэффициенты аппроксимационного метода [6].

В экспериментальных исследованиях КС с использованием звуковой карты, была определена максимально допустимая амплитуда для тестового сигнала A=0,25 В. Используемый диапазон частот определялся полосой пропускания звуковой карты 20…20000 Гц согласно паспортным данным производителя. Частоты тестовых сигналов выбирались из этого диапазона с учетом ограничений [7]. В эксперименте при определении АЧХ первого и второго порядков были выбраны следующие параметры: начальная частота $f_н$ =125 Гц; конечная частота $f_к$ =3125 Гц; шаг изменения

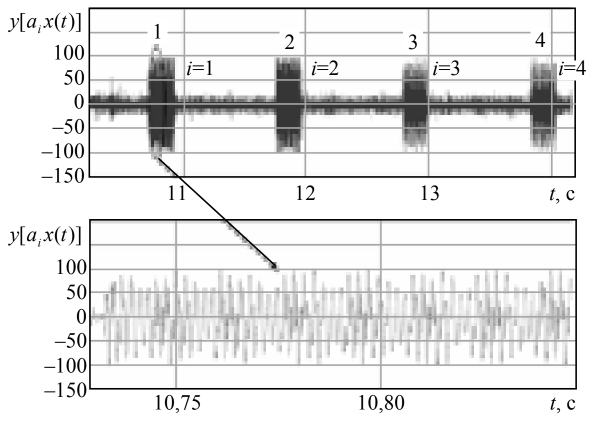


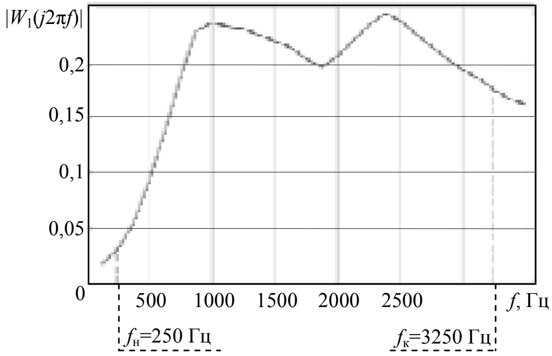
Рис. 3. Принятая группа сигналов–откликов, соответствующих амплитудам тестовых сигналов: –1 (1); 1 (2); –0,644 (3); 0,644 (4) при N=4

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

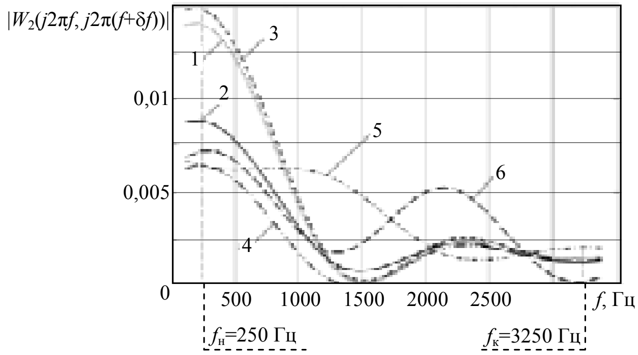
частоты Δf =125 Гц. При определении АЧХ второго порядка смещение по частоте $\delta f=f_2-f_1$ принимало значения от 201 до 3401 Гц с шагом h=100 Гц.

Из принятых сигналов–откликов для каждой группы формируется взвешенная сумма (3) $y_n(t)$ (см. рисунок 2). При n=1 и n=2 получаем ПС отклика КС $y_1(t)$ и $y_2(t)$, соответственно Для каждой ПС отклика находится преобразование Фурье (используется БПФ), и из полученных спектров выделяются только информативные гармоники (6), амплитуды которых представляют собой значения искомых характеристик АЧХ первого и второго порядков. АЧХ первого порядка $|W_1(j2\pi f)|$ получаем, выделяя в спектре ПС отклика КС $y_1(t)$ на тестовый сигнал $A\cos 2\pi ft$ гармонику с частотой f. АЧХ второго порядка $|W_2(j2\pi f_1,\ j2\pi f_2)|$ получим, выделив из спектра ПС отклика КС $y_2(t)$ на тестовый сигнал $A\cos 2\pi f_1 t + A\cos 2\pi f_2 t$ гармонику с суммарной частотой f_1+f_2.

Полученные в результате цифровой обработки данных экспериментов АЧХ первого порядка $|W_1(j2\pi f)|$ и поддиагональные сечения АЧХ второго порядка $|W_2(j2\pi f,\ j2\pi(f+\delta f))|$, полагая $f_1=f$ и $f_2=f+\delta f$, после сглаживания с помощью вейвлета Coiflet [8] при δf=201; 801; 1401; 2001 Гц, представлены на рис. 4.



а



б

Рис. 4. АЧХ первого порядка после сглаживания вейвлетом типа coiflet второго уровня (а); поддиагональные сечения АЧХ второго порядка (б) после сглаживания с помощью вейвлета coiflet пятого уровня при δf: 6,25 (2); 12,5 (1); 25 (3); 50 (6); 100 (4); 200 Гц (5).

Поверхность, построенная из поддиагональных сечений АЧХ второго порядка после сглаживания вейвлетом типа Reverse Biorthogonal третьего уровня при различных значениях (δf), представлена на рис. 5.

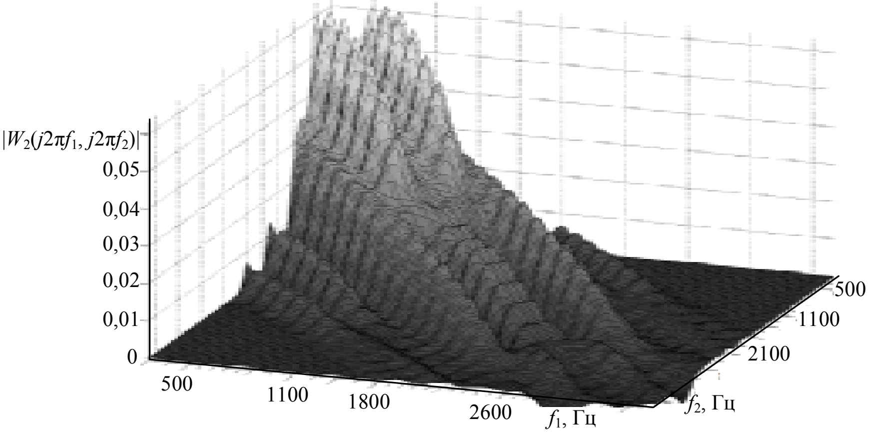


Рис. 5. Поверхность АЧХ второго порядка, сглаженная вейвлетом Reverse Biorthogonal третьего уровня

Разработана методика экспериментальных исследований непрерывного КС ТКС для идентификации его характеристик с учетом нелинейных и динамических свойств на основе моделей в виде РВ в частотной области. Методика основана на применении аппроксимационного метода идентификации НДС с помощью составления линейных комбинаций откликов системы на входные полигармонические сигналы различных амплитуд.

Разработанные программно-аппаратные средства, реализующие методику идентификации, применяются для построения информационной модели непрерывного КС 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 ТКС: точность воспроизведения сигналов, пропускную способность, помехозащищенность.

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

Литература

1. Осадчий, С.І. Ідентифікація динаміки радіорелейного каналу передачі даних / С.І. Осадчий, О.А. Саула // Проблеми інформатизації та управління: Зб. наук. пр. НАУ, 2004. — Вип. 11. — С. 157 — 160.
2. 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.
3. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: учеб. для вузов. В 5 тт. Т. 2. / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 638 с.
4. Данилов, Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филиппов. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
5. Doyle, F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, D.A. Ogunnaike. — London: Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. — 314 p.
6. Павленко, В.Д. Исследование погрешностей аппроксимационного метода идентификации нелинейных динамических объектов в виде ядер Вольтерра / В.Д. Павленко, С.В. Павленко // Электротехн. и компьютер. системы. — 2010. — Вып. 01 (77). — С. 102 — 108.
7. Павленко, В.Д. Ограничения выбора частот тестовых полигармонических сигналов для идентификации нелинейной системы / В.Д. Павленко, С.И.М. Исса // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2009.—Вып. 1 (31). — С. 107 — 113.
8. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB M / Н.К. Смоленцев. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 304 с.

References

1. Osadchyi, S.I. Identyfikatsiia dynamiky radioreleinoho kanalu peredachi danykh [Identification of Radio-Relay Data Transfer Channel Dynamics]/ S.I. Osadchyi, O.A. Saula // Problemy informatyzatsii ta upravlinnia: Zb. nauk. pr. NAU [Informatization and Control Problems: NAU Coll. Sc. Pap.], 2004. — Issue 11. — PP. 157 — 160.
2. 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.
3. Pupkov, K.A. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. dlya vuzov. V 5 tt. T. 2.[Methods of Classic and Modern Automatic Control Theory. Statistical Dynamics and Intensification of Automatic Control Systems: a textbook for institutes of higher education. In 5 vol. Vol. 2] / K.A. Pupkov, N.D. Egupov. — Moscow, 2004. — 638 p.
4. Danilov, L.V. Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [Nonlinear Electric Circuits Theory] / L.V. Danilov, P.N. Matkhanov, E.S. Filippov. — Leningrad, 1990. — 256 p.

 ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

5. Doyle, F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, D.A. Ogunnaike. — London: Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. — 314 p.
6. Pavlenko, V.D. Issledovanie pogreshnostey approksimacionnogo metoda identifikacii nelineynykh dinamicheskikh ob"ektov v vide yader Vol'terra [Inevstigation of Errors in Approximation Identification Method for Identifying Nonlinear Dynamic Objects in the Form of Volterra Kernels] / V.D. Pavlenko, S.V. Pavlenko // Elektrotekhn. i komp'yuter. sistemy. — 2010. — Issue 01 (77). — PP. 102 — 108.
7. Pavlenko, V.D. Ogranicheniya vybora chastot testovykh poligarmonicheskikh signalov dlya identifikacii nelineynoy sistemy [Limitation in Selecting Polyharmonic Test Signals Frequences for Identifying Nonlinear Systems] / V.D. Pavlenko, S.I.M. Issa // Tr. Odes. politekhn. un-ta [Transac.of Odessa Polytech. Univ.] — Odessa, 2009.— Issue 1 (31). — PP. 107 — 113.
8. Smolencev, N.K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB M [Wavelet Theory Foundations. Wavelets in MATLAB] / N.K. Smolentsev. — Moscow, 2005. — 304 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Усов А.В.

Поступила в редакцию 5 сентября 2011 г.