

М. Г. Мясникова

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИГНАЛОВ

M. G. Myasnikova

APPLICATION PARAMETRIC METHODS FOR THE ANALYSIS OF NON-LINEAR SIGNALS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается применение метода Прони для анализа нелинейных сигналов. Отдельно рассмотрено применение метода для сигналов с различными видами нелинейности – нелинейность типа нечувствительность, нелинейность типа насыщение, комбинированная нелинейность. **Материалы и методы.** Исследования проводились на модельных сигналах путем математического моделирования алгоритмов обработки в пакетах прикладных программ. **Результаты.** Исследованы погрешности измерения амплитудных и частотных параметров при использовании метода Прони для нелинейных сигналов. Для каждого из рассмотренных в статье видов нелинейности приведен алгоритм обработки сигнала, позволяющий повысить точность измерения параметров. **Выводы.** При всех рассмотренных видах нелинейности возможно применение метода Прони для измерения параметров сигналов. Погрешность определения параметров может быть уменьшена за счет увеличения порядка модели и использования коррекции по линейным участкам.

A b s t r a c t. Background. In the article the application of the Prony method for the analysis of nonlinear signals is considered. Separately, application of the method for signals with various types of nonlinearity is considered (nonlinearity of the type of insensitivity, nonlinearity of the saturation type, combined nonlinearity). **Materials and methods.** The studies were carried out on model signals by mathematical modeling of processing algorithms in application software packages. **Results.** The errors of the measurement of the amplitude and frequency were investigated using the Prony method for nonlinear signals. For each of the types of nonlinearity considered in the article, a signal processing algorithm is given, which makes it possible to improve the accuracy of measurement of parameters. **Conclusions.** With all the types of nonlinearity considered, it is possible to use the Prony method to measure the signal parameters. The error in determining the parameters can be reduced by increasing the order of the model and using correction for linear sections.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нелинейный сигнал, спектр сигнала, нелинейность типа нечувствительность, нелинейность типа насыщение.

Key words: nonlinear signal, signal spectrum, nonlinearity of the type of insensitivity, nonlinearity of the type of saturation.

Введение

Сигнал в измерительном тракте часто подвергается нелинейным преобразованиям. Нелинейность типа «нечувствительность», «насыщение» или комбинированная – типичное искажение, с которым приходится сталкиваться. Уже стало традиционным применение метода Прони для определения параметров сигналов сложной формы [1, 2]. Покажем, что его применение возможно и для нелинейных сигналов.

Постановка задачи

При прохождении гармонического сигнала через нелинейную цепь возникают искажения его формы: кроме основной гармоники с частотой f возникают высшие гармоники с частотами $2f$, $3f$ и т.д. Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом гармоник K_g , равным отношению среднеквадратического напряжения высших гармоник к среднеквадратическому значению напряжения первой гармоники [3].

Теоретическое обоснование возможности применения метода Прони [4] для анализа нелинейных сигналов основано на том, что при нелинейном преобразовании происходит расширение спектра сигнала, он становится многомодальным, одна из этих мод является информативной компонентой, а ее параметры соответствуют параметрам сигнала до нелинейного преобразования. Рассмотрим разные виды нелинейности.

Нелинейность типа «нечувствительность»

На рис. 1 показан сигнал с нелинейностью такого вида [5], а на рис. 2 – его спектр.

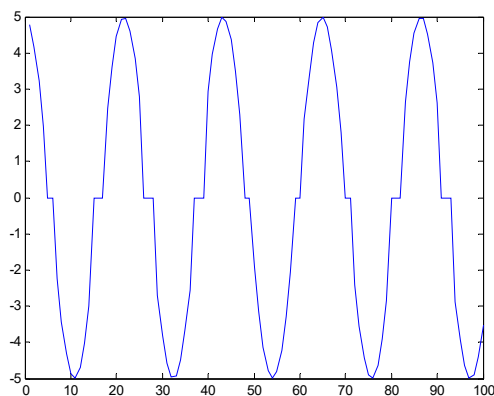


Рис. 1. Сигнал с нелинейностью типа «нечувствительность»

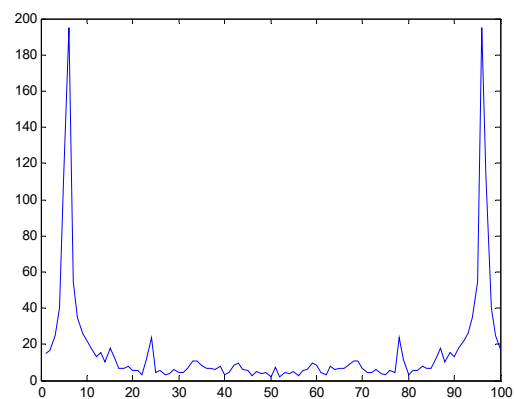


Рис. 2. Спектр сигнала

Видно, что спектр сигнала содержит множественные резонансы, поэтому он многомодальный и может быть описан (аппроксимирован) моделью высокого порядка. Для выделения информативной составляющей применим аппроксимацию методом Прони с порядком модели p :

$$x_i = \sum_{j=1}^q A_j \exp(-\alpha_j t_i) \cos(2\pi f_j t_i + \phi_j) \quad (q = p/2). \quad (1)$$

На рис. 3 показано разложение сигнала, представленного на рис. 1, на моды при порядке модели $p = 8$.

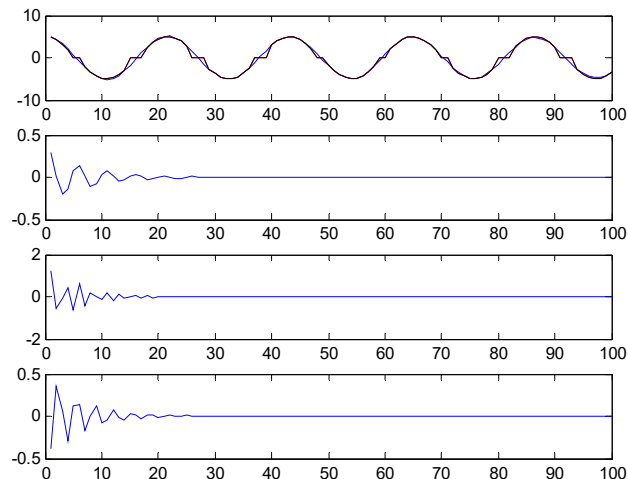


Рис. 3. Выделение информативной составляющей при нелинейности типа «нечувствительность»

Первая составляющая разложения соответствует информативной компоненте, на нее наложен исходный нелинейный сигнал. Информативная компонента определяется по оценке частоты зарегистрированного сигнала, например, по периоду, определяемому точками пересечения нулевого уровня или по расстоянию между экстремумами [9]. Погрешность определения параметров определяется порядком модели p .

По методу Прони для выбранного порядка получены параметры $f = 9,2501$ Гц, $A = 4,0014$ размерных единиц (сигнал, подвергшийся нелинейному преобразованию, имел параметры $f = 9,25$ Гц, $A = 4,0$ размерных единиц) при нечувствительности на уровне 35 %. Погрешность определения амплитудных параметров уменьшена благодаря выделению линейных участков по производной сигнала.

Такой же подход может быть использован и при нелинейности типа «насыщение».

Нелинейность типа «насыщение»

Еще один часто встречающийся тип – нелинейность типа «насыщение», типичное искажение, с которым приходится сталкиваться. Для определения параметров такого сигнала также применим метод Прони [6].

На рис. 4 показан сигнал с выраженным насыщением, а на рис. 5 – его спектр.

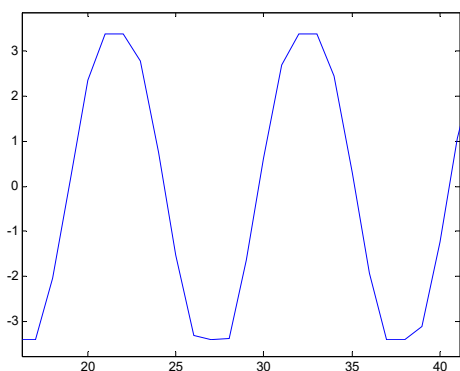


Рис. 4. Сигнал с выраженным насыщением

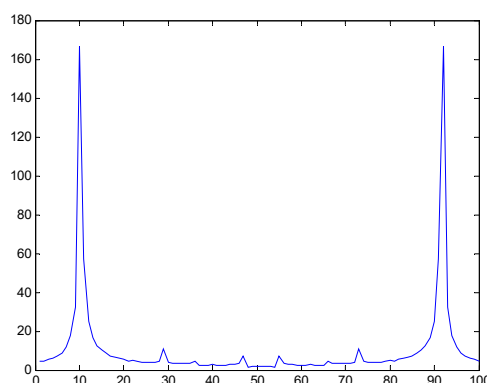


Рис. 5. Спектр данного сигнала

Как и в случае нелинейности типа «нечувствительность», спектр сигнала содержит множественные резонансы, поэтому он многомодальный и тоже может быть описан моделью высокого порядка. Для выделения информативной составляющей применим аппроксимацию методом Прони порядком p (1) [8, 10].

На рис. 6 показано разложение такого сигнала на моды при порядке $p = 8$.

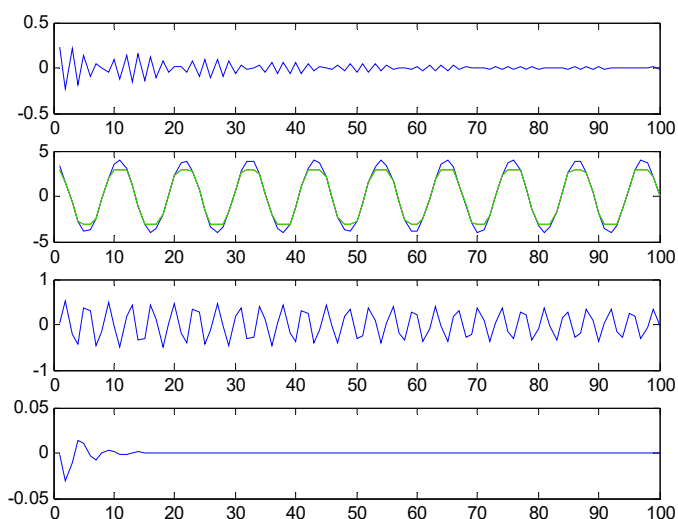


Рис. 6. Выделение информативной составляющей при нелинейности типа «насыщение»

Исследовалось выделение сигнала в шумах, подвергнутого нелинейному преобразованию:

- измерена амплитуда $A = 5,0827$ (задано 5); частота $f = 9,2473$ (задано 9.25), отношение сигнал/помеха = 15, нелинейность 75 %;
- измерена амплитуда $A = 4,5574$ (задано 5); частота $f = 9,21$ (задано 9.25), отношение сигнал/помеха = 15, нелинейность 50 %.

В обоих случаях амплитуда корректировалась. Коэффициент корректировки амплитуды «обрезанной» составляющей вычислен на основе МНК на линейных участках, определяемых по производной сигнала (рис. 7).

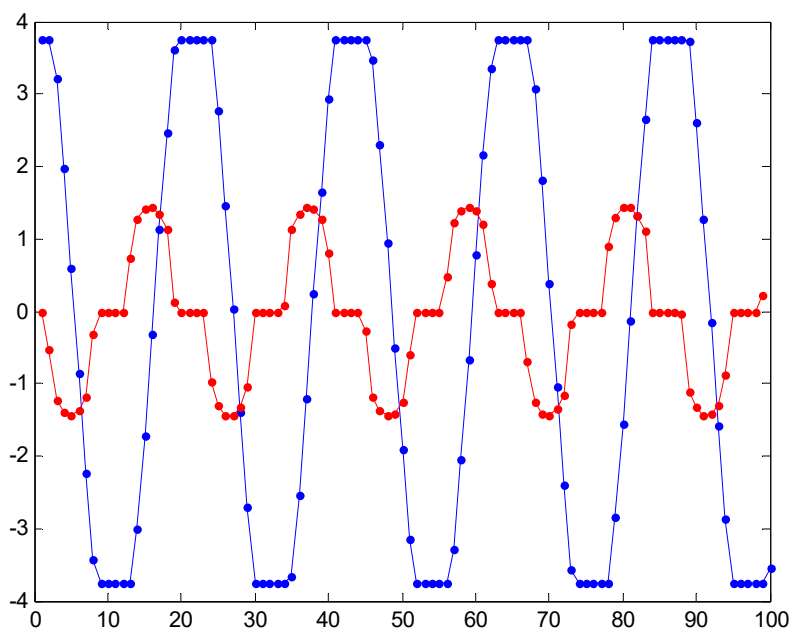


Рис. 7. Выделение линейных участков по производной для коррекции амплитуды

Погрешность определения амплитуды для каждого из вариантов приведена на рис. 8, а частоты – на рис. 9.

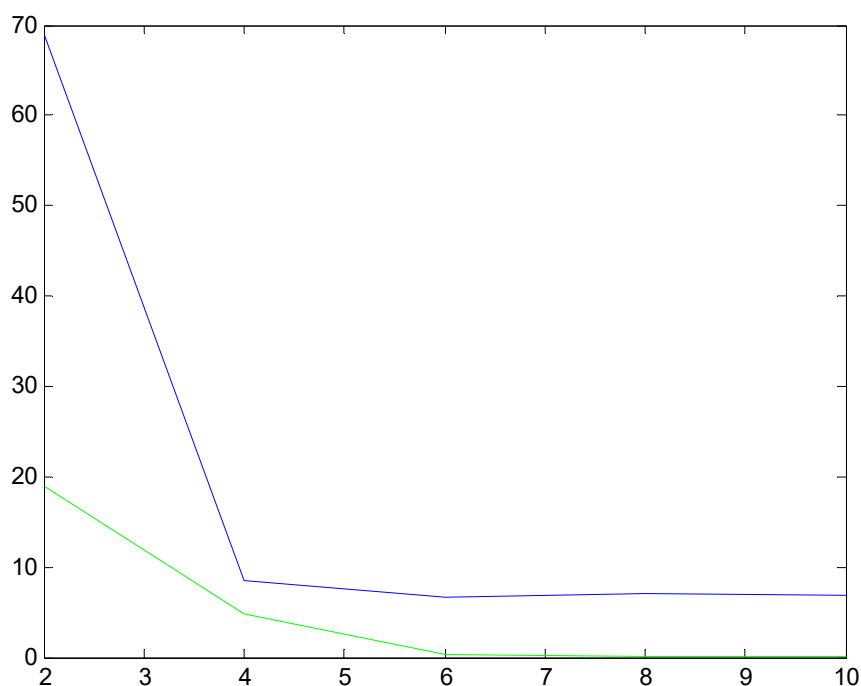


Рис. 8. Погрешность определения амплитуды в % от порядка: без коррекции и с коррекцией по линейным участкам

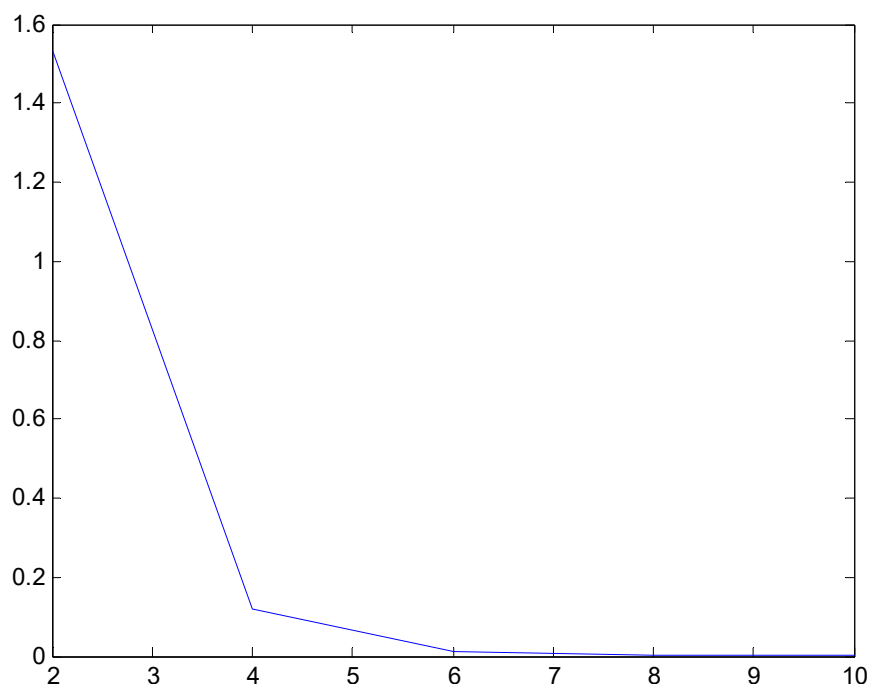


Рис. 9. Погрешность определения частоты в % от порядка

Такой же подход может быть использован и при насыщении типа «нечувствительность», а также при одновременном наличии обоих типов нелинейности.

Комбинированная нелинейность

При тех же посылах выделим составляющую и в случае комбинированной нелинейности. Видно, что составляющая выделяется, что проиллюстрировано на рис. 10.

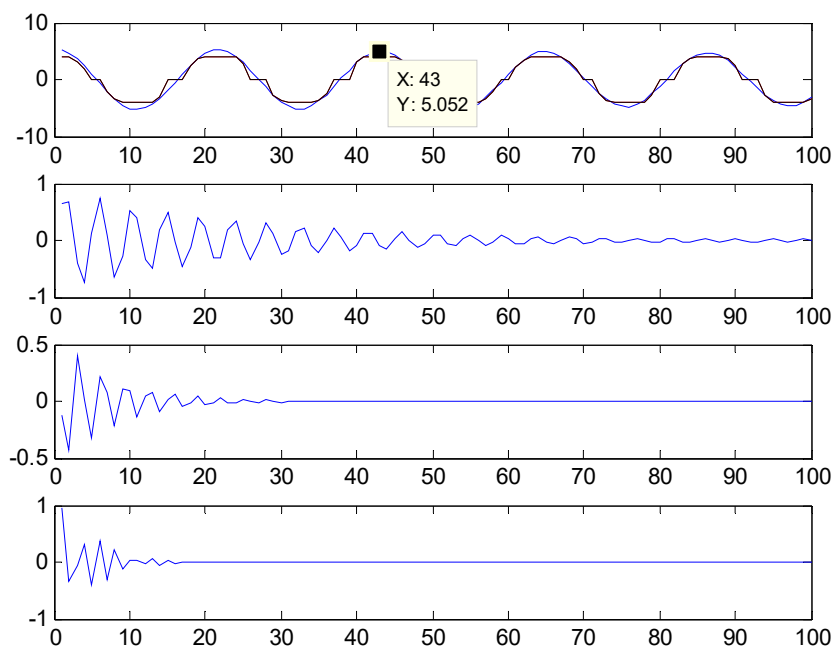


Рис. 10. Разложение сигнала с комбинированной нелинейностью

Алгоритм выделения одинаков для всех типов нелинейности:

- 1) регистрируется отклик;
- 2) оценивается частота f_c по расстоянию между экстремумами (при нелинейности типа «нечувствительность») или по пересечению «нуля» (при нелинейности типа «насыщение»);

- 3) выполняется процедура Прони с завышенным порядком;
- 4) выбирается составляющая разложения с частотой наиболее близкой к f_c ;
- 5) параметры этой составляющей принимаются за параметры сигнала до нелинейного преобразования в измерительном тракте.

Погрешность зависит не только от нелинейности, но и от отношения сигнал/помеха. На рис. 11 приведен график зависимости погрешности определения амплитуды от этого отношения.

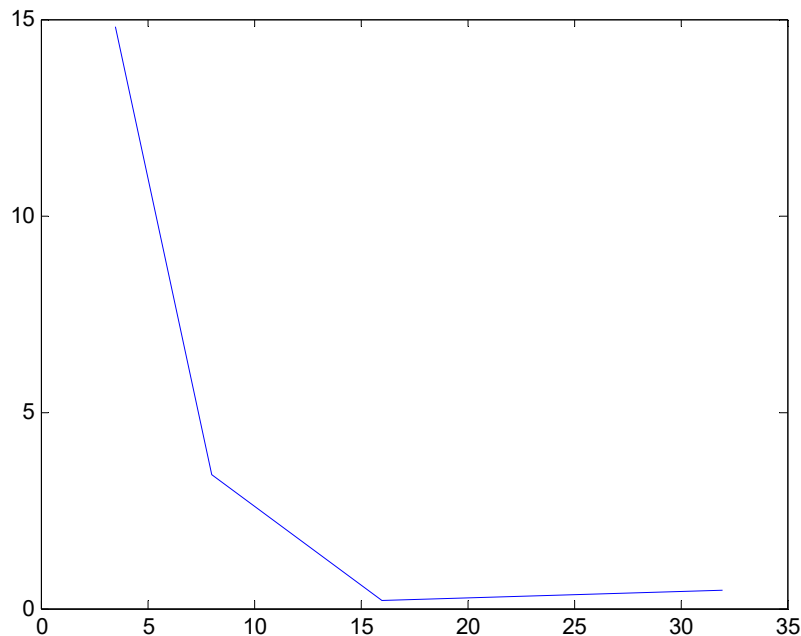


Рис. 11. Зависимость относительной погрешности определения амплитуды в % от отношения сигнал/помеха

Заключение

При всех видах нелинейности возможно применение метода Прони для измерения параметров сигналов. Погрешность определения параметров может быть уменьшена за счет увеличения порядка модели и использования коррекции по линейным участкам.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Аппроксимация сигналов суммой комплексных экспонент / А. Г. Дмитриенко, М. Г. Мясникова, А. В. Пушкарева, Б. В. Цыпин // Датчики и системы. – 2012. – № 7. – С. 2–5.
2. Никишин, О. Н. Применение экспоненциальных моделей для анализа и сжатия измерительной информации / О. Н. Никишин, М. Г. Мясникова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 35–39.
3. Кушнир, Ф. В. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие для вузов / Ф. В. Кушнир. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с.
4. Марпл.-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. / С. Л. Марпл.-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
5. Мясникова, М. Г. Применение параметрических методов для анализа сигналов с нелинейностью типа нечувствительность / М. Г. Мясникова, Д. А. Мальков // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения-2016». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 99–100.
6. Мясникова, М. Г. Применение параметрических методов для анализа сигналов с нелинейностью типа насыщение / М. Г. Мясникова, А. А. Пирогова, А. А. Купцов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения-2016». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 100–102.

7. Мясникова, М. Г. Развитие методов цифровой обработки сигналов для информационно-измерительных систем / М. Г. Мясникова, Б. В. Цыпин, С. И. Торгашин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 46–47.
8. Ионов, С. В. Применение методов цифрового спектрального оценивания в задаче измерения параметров сигнала / С. В. Ионов, В. В. Козлов, М. Г. Мясникова, Б. В. Цыпин // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 26–30.
9. Мясникова, Н. В. Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах : монография / Н. В. Мясникова, М. Г. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин. – М. : Физматлит, 2016.
10. Мясникова, М. Г. Выбор методов спектрального оценивания для систем контроля динамических характеристик датчиков давления / М. Г. Мясникова, С. А. Кузнецов, Б. В. Цыпин, А. П. Панов // Измерение, мониторинг, управление, контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 45–51.

Мясникова Мария Георгиевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Myasnikova Mariya Georgievna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of rocket-space
and airation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.391

Мясникова М. Г.

Применение параметрических методов для анализа нелинейных сигналов / М. Г. Мясникова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 30–36. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-3-4.