

УДК 534.1

DOI: 10.30987/article_5c0f808f755da4.36546941

С.И. Досько, В.М. Утенков, А.А. Молчанов

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМА АВТОКОЛЕБАНИЙ В СТАНКАХ

Рассмотрены возможности использования параметрического спектрального анализа (ПСА) для идентификации режима автоколебаний в станках, что позволит: выполнить без побочных эффектов спектральное оценивание сегментов временных рядов во временных окнах ограниченной продолжительности; использовать модель нестационарного временного ряда; определить собственный

спектр частот и спектр модального демпфирования мод системы, проявившихся на данном сегменте временного ряда; получить аналитический спектр Фурье сигнала.

Ключевые слова: параметрический спектральный анализ, ПСА, автоколебания, метод Прони.

S.I. Dosko, V.M. Utenkov, A.A. Molchanov

POTENTIALITIES OF PARAMETRIC SPECTRAL ANALYSIS USE FOR IDENTIFICATION OF SELF-OSCILLATION MODE IN MACHINES

The potentialities of parametric spectral analysis (PSA) use for the identification of a self-oscillation mode in machines, which will allow carrying out a spectral estimate of time series segments without by-effects in time windows of limited duration; using a model of a non-stationary time series (increasing or decreasing in a time window); defining an own range

of frequencies and a range of modal damping of a mod system manifested in the given segment of time series; obtaining Fourier analytical spectrum of a signal, that is, without BPF use.

Key words: parametric spectral analysis, PSA, SELF-OSCILLATION, Prony's method.

Введение

Вопрос автоколебаний в станках был и остается одним из важных и наиболее обсуждаемых в научных кругах [1-4]. Однако, на наш взгляд, автоколебания в станках наиболее подходящим образом описаны в книге И. Тлустого «Автоколебания в станках» [5]: «При механической обработке при определенных условиях возникают интенсивные колебания, амплитуда которых быстро возрастает, а в случае менее интенсивных колебаний можно наблюдать, что амплитуда быстро устанавливается, достигнув определенной величины. В большинстве же случаев колебания носят столь интенсивный характер, что приходится прекращать резание, в связи с чем амплитуда так и не достигает установившегося значения». Как показывает практика, частота таких колебаний обычно близка к одной (иногда и нескольким) из собственных частот упругой системы станка.

Надо признать, что в отечественной литературе вопрос идентификации режима автоколебаний в станках остается открытым, в связи с чем представляется пер-

спективным использование для этой цели процедуры параметрического спектрального анализа (ПСА). Необходимо отметить, что для идентификации режима автоколебаний (флаттера) лопаток в работе [6] был использован метод Прони. В частности, факт изменения знака и величины демпфирования означает изменение роли этой моды нестационарного колебания.

Метод Прони - это метод моделирования выборочных данных в виде линейной комбинации экспоненциальных функций. Исторически метод Прони - первый метод спектрального анализа временных рядов (1795 г., Гаспар Рише - барон де Prony [7]), но не имеющий непрерывного аналога. Его широкое использование откладывалось почти 200 лет из-за отсутствия устойчивого с вычислительной точки зрения алгоритма, однако сегодня это один из самых популярных методов исследования временных рядов [8; 9].

Оценка параметров нестационарного (экспоненциального) сигнала - одна из самых распространенных задач в различных

областях техники. Это связано с тем, что отклик линейной системы на импульсное воздействие является суммой именно таких сигналов, т.е., оценив параметры сигналов на выходе системы, можно решить задачу идентификации системы и ее состояния. Использование в этих целях преобразования Фурье не всегда дает хорошие результаты, так как это преобразование изначально предназначено для оценки спектра сигнала, а не частоты и в классическом варианте не является статистически устойчивым.

В отличие от спектрального анализа Фурье спектральный анализ Прони как метод ПСА позволяет [8; 9]:

1. Выполнить без побочных эффектов спектральное оценивание сегментов временных рядов во временных окнах ограниченной продолжительности.

2. Использовать модель нестационарного временного ряда (возрастающего или убывающего во временном окне).

3. Определить собственный спектр частот и спектр модального демпфирования мод системы, проявившихся на данном сегменте временного ряда.

4. Получить аналитический спектр Фурье сигнала, т.е. без использования БПФ.

$$\tilde{y}_n = \sum_{k=1}^m [A_k \exp(j2\pi f_k \Delta t n + j\varphi_k) \exp(-\delta_k \Delta t n)], \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где A_k - амплитуда; f_k - частота; φ_k - начальная фаза; δ_k - коэффициент затухания; Δt - период дискретизации сигнала; n - номер отсчета; N - число отсчетов сигнала.

Для работы с реальными сигналами используют метод наименьших квадратов (МНК) Прони, который обладает следующими преимуществами по сравнению с

Программа SAProny

В программе реализован алгоритм, соответствующий МНК Прони, который вложен в оптимизационный цикл по модальной глубине модели (m_{opt}), где в качестве целевой функции использована величина относительной погрешности аппроксимации (невязки) временного ряда. Пре-

В методе Прони [8; 9] отсутствует ряд ограничений, свойственных Фурье-преобразованию. Например, в результате Фурье-преобразования временных рядов, представляющих затухающие синусоиды вида

$$Ae^{-\delta t} \cos(2\pi ft + \varphi),$$

получают оценки трех параметров:

- $A/\delta^{1/2}$ - Фурье-амплитуда;
- φ - фаза;
- f - частота (с учетом диссипативных свойств), точность оценки которой зависит от величины δ .

А в методе Прони используется разложение сегментов временных рядов, в результате которого для временных зависимостей вида

$$Ae^{-\delta t} \cos(2\pi ft + \varphi)$$

определяются оценки всех четырех независимых параметров: A, φ, δ, f .

Метод Прони позволяет аппроксимировать последовательность комплексных данных y_i моделью, состоящей из m затухающих комплексных экспонент \tilde{y}_i :

исходным методом [8; 9]:

- количество комплексных экспонент m (модальная глубина модели) в выражении (1) меньше или равно половине отсчетов в сигнале ($m \leq N/2$);

- ошибки аппроксимации минимальны при соответствующем выборе $m = m_{opt}$.

дусмотрена возможность использования нескольких аппроксимационных моделей: полной модели колебаний по Булгакову [10], суммы затухающих синусоид, суммы экспонент и суммы синусоид. Минимизируется относительная невязка по количеству мод, а внутри цикла определяются

оценки модальных параметров по несколько модифицированному алгоритму Прони, изложенному в [8]. Реализована интерактивная технология спектрального Прони-анализа сигнала с использованием аналитического спектра Фурье.

В качестве примера использования возможностей ПСА для идентификации

режима автоколебаний в станках нами был выбран нестационарный процесс, снятый на токарном станке SU40 и описанный И. Глустым [5]. На рис. 1 представлен график автоколебаний, снятый на шпиндельной бабке. Наибольший вклад вносят колебания на частоте 130 Гц.

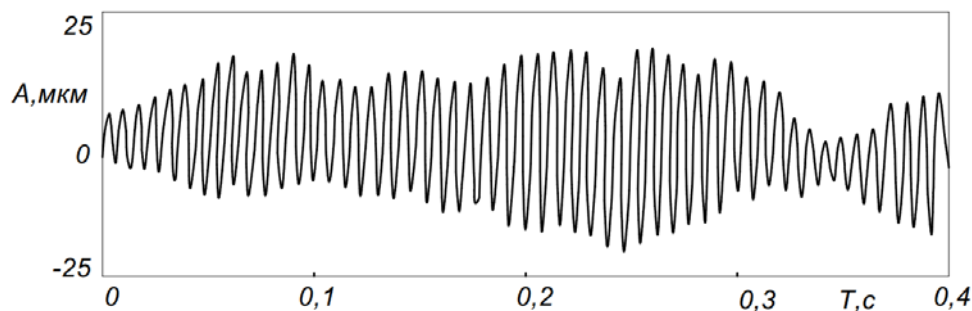


Рис. 1

Этот график был оцифрован с помощью специального программного обеспечения и в дальнейшем считался экспериментальным сигналом. На рис. 2 представлен экс-

периментальный сигнал и результаты его аппроксимации с помощью программы SAProny.

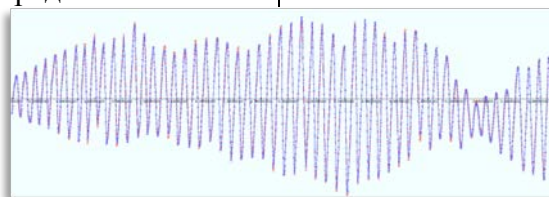


Рис. 2

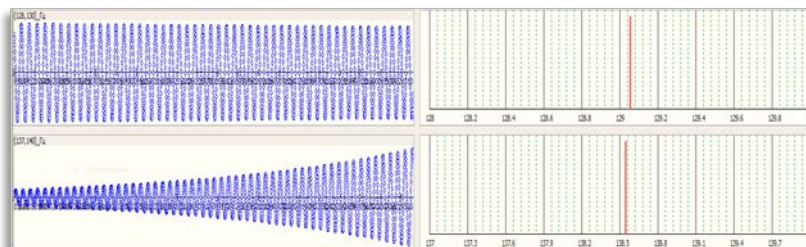
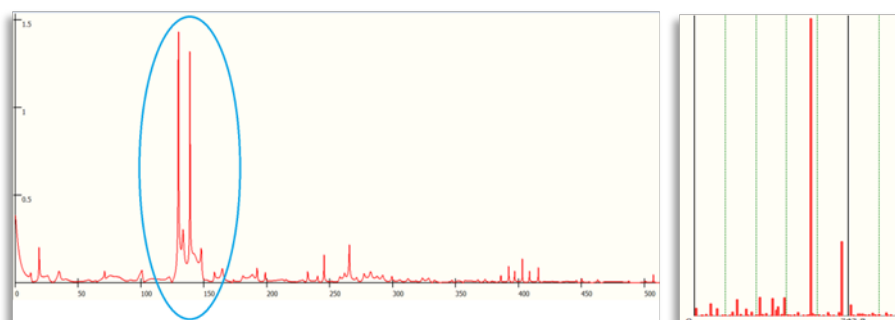


Рис. 3

На рис. 3 представлены результаты аналитической модальной декомпозиции экспериментального сигнала в частотных

диапазонах (128; 130) и (137; 140) Гц (слева) и соответствующие им энергетические спектры Прони (справа).



а)

б)

Рис. 4

На рис. 4а представлен аналитический спектр Фурье сигнала, а на рис. 4б - его спектр амплитуд Прони (амплитуд экспонент). Для большей наглядности и оценки истинных амплитуд спектра на рис. 5а показан график АЧХ в диапазоне (125;

140) Гц, а на рис. 5б - оценки модальных параметров (амплитуда; частота (Гц); модальный коэффициент демпфирования (%); коэффициент затухания (Гц); модальная фаза (рад)).

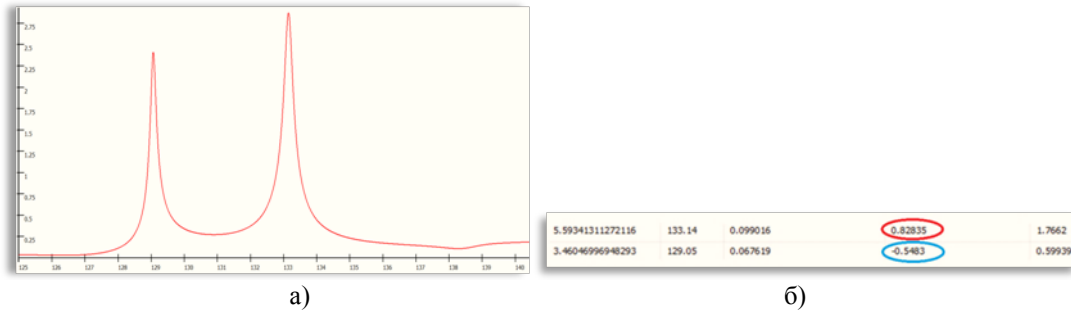


Рис. 5

Заключение

На основе анализа результатов, полученных с помощью ПСА, можно сделать следующие выводы:

- сигнал представляет собой сигнал нестационарного процесса и содержит две основные моды с частотами 129 и 133 Гц;
- мода с частотой 129 Гц имеет небольшой и отрицательный коэффициент демпфирования (0,068 %, или -0,55 1/с), что соответствует практически незатухающим колебаниям (рис. 5б);

- мода с частотой 133 Гц имеет несколько более существенный коэффициент демпфирования, но положительный, что соответствует возрастающим колебаниям.

ПСА вполне может быть использован для идентификации процесса автоколебаний в станках. Аналогичный результат невозможно получить, используя технологию классического спектрального анализа, основанную на быстром преобразовании Фурье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967.
2. Лазарев, Г.С. Автоколебания при резании металлов / Г.С. Лазарев. - М.: Высш. шк., 1971. - 243 с.
3. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: теория и практика / М.Е. Эльясберг. - СПб.: ОКБС, 1993. - 180 с.
4. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. - 184 с.
5. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. - М.: Машгиз, 1956.
6. Балакшин, О.Б. Исследование динамических процессов при флаттере лопаток с использованием метода Прони / О.Б. Балакшин, Б.Г. Кухаренко, А.А. Хориков // *Авиационно-космическая техника и технология*. - 2007. - № 10 (46). - С. 40-44.
7. Prony, R. Essai experimental et analytique / R. Prony // *Journal de l'Ecole Polytechnique*. - Paris, 1796. - V. 1. - I. 2.
8. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его применения: [пер. с англ.] / С.Л. Марпл-мл. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
9. Кухаренко, Б.Г. Технология спектрального анализа на основе быстрого преобразования Прони / Б.Г. Кухаренко // *Информационные технологии*. - 2008. - № 4. - С. 38-42.
10. Булгаков, Б.В. Колебания / Б.В. Булгаков. - М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1954.
1. Kudinov, V.A. *Machine Dynamics* / V.A. Kudinov. - M.: Mechanical Engineering, 1967.
2. Lazarev, G.S. *Self-Oscillation at Metal Cutting* / G.S. Lazarev. - M.: Higher School, 1971. - pp. 243.
3. Eliyasberg, M.E. *Machine-Tool Self-Oscillation: Theory and Practice* / M.E. Eliyas. - S-Pb.: SDB, 1993. - pp. 180.
4. Zharkov, I.G. *Vibration at Edge Tool Machining* / I.G. Zharkov. - L.: Mechanical Engineering, Leningrad Section, 1986. - pp. 184.

5. Tlusty, I. *Self-Oscillation in Machine-Tools* / I.Tlusty. – М.: Machgiz, 1956.
6. Balakshin, O.B. Investigation of dynamic processes at blade flutter using Prony's method / O.B. Balakshin, B.G. Kukharenko, A.A. Khorikov // *Aerospace Engineering and Technology*. – 2007. – No.10 (46). – pp. 40-44.
7. Prony, R. Essai experimental et analytique / R. Prony // *Journal de l'Ecole Polytechnique*. - Paris, 1796. - V. 1. - I. 2.
8. Marple-young, S.L. *Digital Spectral Analysis and Its Application*: [transl. from. Engl.] / S.L. Marple-young. – М.: Mir, 1990. – pp. 584.
9. Kukharenko, B.G. Spectral analysis technology based on Prony's rapid transformation / B.G. Kukharenko // *Information Technologies*. – 2008. – No.4. – pp. 38-42.
10. Bulgakov, B.V. *Oscillation* / B.V. Bulgakov. – М.: State Publishing House of Technical Theoretical Literature, 1954.

Статья поступила в редакцию 4.09.18.

Рецензент: д.т.н., доцент МГТУ «СТАНКИИ»

Молодцов В.В.

Статья принята к публикации 12.11.18.

Сведения об авторах:

Доско Сергей Иванович, к.т.н., доцент, ст. науч. сотрудник ИКТИ РАН, тел. 926 -318-82-24, e-mail: Dosko@mail.ru.

Утенков Владимир Михайлович, д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Dosko Sergey Ivanovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Senior scientist of IKTI of RAN, e-mail: Dosko@mail.ru.

Utenkov Vladimir Mikhailovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of Bauman STU of Moscow.

Молчанов Александр Александрович, ассистент МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: alexandrmolchanov@inbox.ru.

Molchanov Alexander Alexandrovich, Assistant of Bauman STU of Moscow, e-mail: alexandrmolchanov@inbox.ru.