

Моделирование и прогнозирование квазипериодических процессов в технических объектах на основе цилиндрических моделей изображений

В.Р. Крашенинников¹, Ю.Е. Кувайскова¹

¹Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. Для эффективного управления техническим объектом необходим достаточно точный прогноз его состояния. Состояние объекта характеризуется системой временных рядов контролируемых показателей. В этих рядах иногда наблюдается нерегулярная периодичность (квазипериодичность). В настоящей работе для описания и прогнозирования таких рядов предлагается использовать модели квазипериодических случайных процессов на базе цилиндрических моделей изображений. Применение этих моделей продемонстрировано на примере прогнозирования процесса вибраций гидроагрегата. Показано, что использование этих моделей обеспечивает более высокую точность прогнозирования по сравнению с классическими подходами.

1. Введение

С целью повышения эффективности управления объектом необходим точный прогноз его технического состояния, характеризующегося множеством контролируемых показателей [1-4]. В процессе мониторинга объекта эти показатели регистрируются датчиками через определенные промежутки времени и в виде сигналов с дискретным временем поступают на стойку управления объектом. Эти сигналы могут быть использованы для моделирования процесса функционирования объекта и прогнозирования его состояния с целью принятия эффективных решений по управлению им [1].

Набор регистрируемых значений показателей объекта может быть представлен в виде системы временных рядов. Часто динамика временных рядов имеет нерегулярную периодичность – квазипериодичность. Квазипериодическое поведение есть повторения с компонентом непредсказуемости. Например, вибрация различных двигателей, турбин, агрегатов и тому подобное.

Для описания и прогнозирования таких процессов могут быть использованы различные модели, например, авторегрессионные модели с комплексными корнями характеристического уравнения [5, 6] или гармонические модели [7], которые не всегда позволяют с высокой точностью прогнозировать нерегулярную динамику квазипериодических процессов. В данной работе для повышения точности прогнозирования динамики технических объектов предлагается использовать модели квазипериодических процессов на основе цилиндрических изображений [8-11].

Цель исследования – анализ эффективности применения цилиндрических моделей изображений для прогнозирования состояния объекта.

2. Цилиндрические модели изображений

Для квазипериодического процесса характерна его двойная коррелированность, то есть сильная корреляция имеется как между соседними отсчётами, так и между отсчётами, отстоящими на несколько периодов [8].

Рассмотрим цилиндрическое изображение, например, изображение вала вращения. Если его разрезать вдоль и развернуть в плоскость, то оно превращается в прямоугольное изображение. На исходном цилиндрическом изображении точки вдоль линии разреза были рядом, поэтому отсчёты в них сильно коррелированы и сигнал в виде последовательности строк этого разрезанного изображения будет иметь характерные свойства квазипериодического изображения.

Для построения цилиндрической модели изображения рассмотрим спиралевидную сетку на цилиндре, показанную на рисунке 1(а). Строки этой сетки представляют собой витки спирали (винтовой линии). И всё изображение может рассматриваться как одна последовательность отсчётов вдоль этой спирали, что очень удобно для авторегрессионного представления.

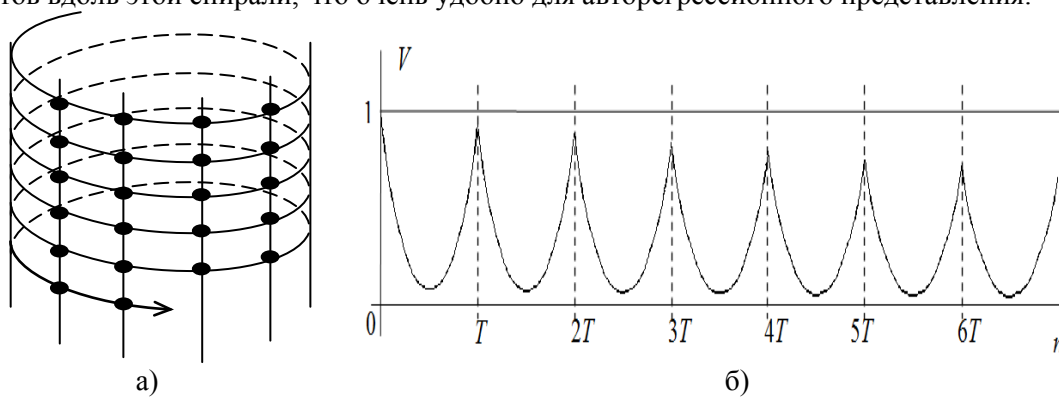


Рисунок 1. Цилиндрическая сетка (а), вид корреляционной функции (б).

Рассмотрим, например, аналог авторегрессионной модели Хабиби [10, 12]:

$$x_{k,l} = \rho x_{k,l-1} + r x_{k-1,l} - \rho r x_{k-1,l-1} + \beta \xi_{k,l}, \tag{1}$$

где k – номер витка спирали; l – номер узла в витке; ρ и r – параметры модели; $\xi_{k,l}$ – независимые стандартные случайные величины; при этом $l = \overline{0, T-1}$; $x_{k,l} = x_{k+1,l-T}$ при $l \geq T$; T – период, то есть количество точек в одном витке. Для использования модели (1) значения на первом витке должны быть заданы отдельно. В модели (1) сетка может рассматриваться и как обычная цилиндрическая, то есть как последовательность окружностей.

Модель (1) может быть представлена в эквивалентном виде как модель случайного процесса, представляющего собой развёртку изображения вдоль спирали:

$$x_n = \rho x_{n-1} + r x_{n-T} - \rho r x_{n-T-1} + \beta \xi_n, \tag{2}$$

где $n = kT + l$. Параметр ρ влияет на коррелированность вдоль строк, то есть на гладкость процесса. Параметр r влияет на коррелированность отсчётов на расстоянии периода. При значениях r , близких к единице, соседние строки изображения (витки спирали) будут сильно коррелированы, поэтому эту модель можно использовать для описания и имитации квазипериодических сигналов. Применяя z-преобразование, можно показать, что ковариационная функция $V(n) = Cov(x_k, x_{k+n})$ случайного процесса, определяемого моделью (2), имеет вид

$$V(n) = \beta^2 \left(\frac{1}{(1-r^2)T} \sum_{k=0}^{T-1} \frac{z_k}{(1-\rho z_k)(z_k-\rho)} z_k^n + \frac{s}{(1-\rho^2)(1-rs)(s-r)} \rho^n \right),$$

где $z_k = \sqrt[T]{r} \exp(i2k\pi/T)$ и $s = \rho^T$. Вид её графика показан на рисунке 1(б). Эта функция затухающе-периодична, её значения постепенно убывают с увеличением номера периода, то

есть с увеличением расстояния значения процесса становятся менее коррелированными, но на расстояниях, кратных периоду, корреляция относительно большая, что характерно для квазипериодических процессов.

Модель (1) является лишь простейшей моделью. Поэтому она может не дать достаточно адекватного описания реального процесса. В качестве обобщения в правой части выражения (1) можно отказаться от специального вида коэффициента при $x_{k-1,l-1}$, а также ввести дополнительные слагаемые, то есть зависимость очередного отсчёта изображения от большего количества предыдущих отсчётов. Например, модель

$$x_{k,l} = a x_{k,l-2} + b x_{k,l-1} + c x_{k-1,l-1} + d x_{k-1,l} + \beta \xi_{k,l}$$

Параметры этой модели для адекватного представления конкретного временного ряда можно подбирать, например, методом наименьших квадратов.

3. Прогнозирование состояния технического объекта

В качестве объекта исследования рассмотрим данные по гидроагрегату (одна из турбин Краснополянской ГЭС). На рисунках 2-4 показаны графики величины вибрации, полученные с трёх датчиков, расположенных на различных частях агрегата. Объём каждой выборки исследуемых процессов вибраций составил 96 наблюдений. Визуально наблюдается наличие квазипериодичности в этих процессах.

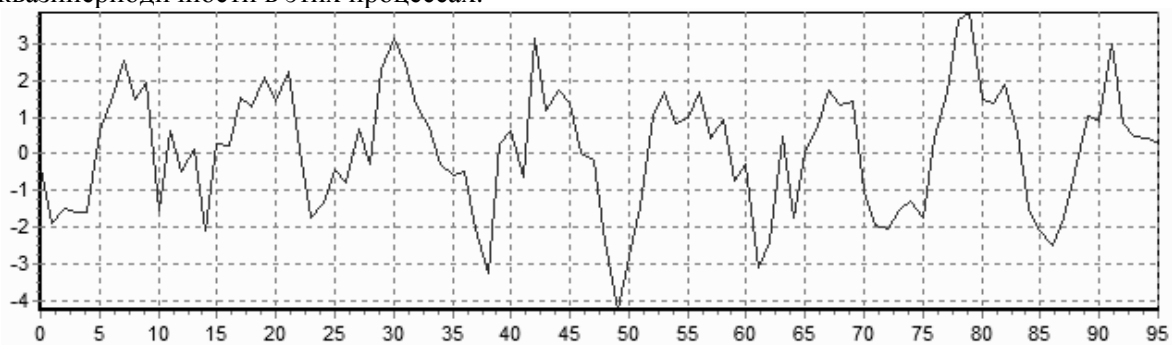


Рисунок 2. График первого процесса вибрации гидроагрегата.

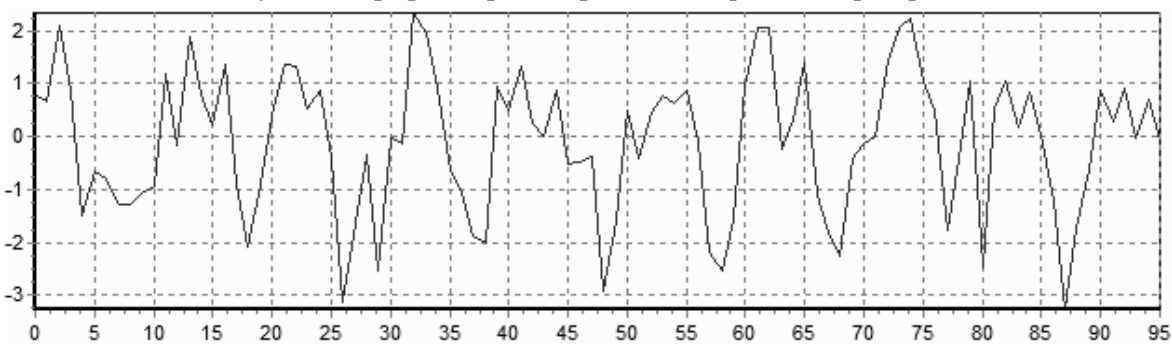


Рисунок 3. График второго процесса вибрации гидроагрегата.

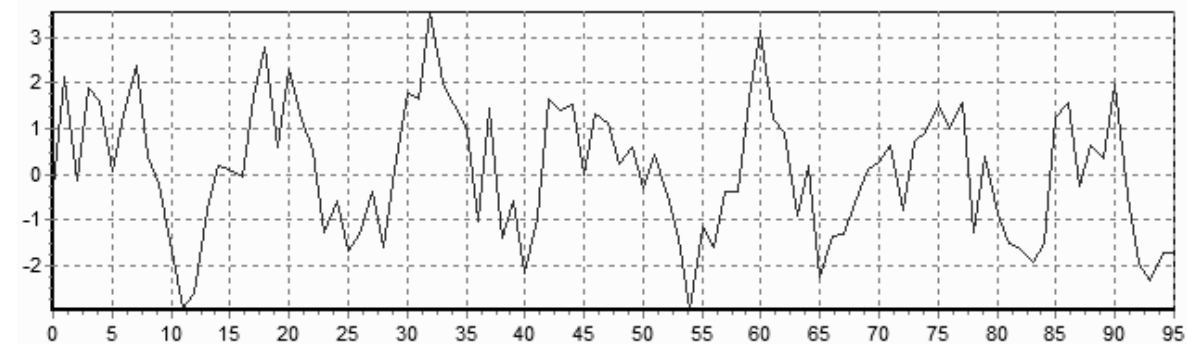


Рисунок 4. График третьего процесса вибрации гидроагрегата.

Для оценки качества прогнозирования этих процессов выборки значений разобьём на две части: обучающую выборку (90% от объёма исходных наблюдений) и контрольную выборку (10% от объёма исходных наблюдений). По обучающей выборке построим методом наименьших квадратов модели исследуемых процессов: авторегрессионную модель цилиндрического изображения (2), обычную авторегрессионную модель второго порядка с комплексными корнями характеристического уравнения и гармоническую модель. По контрольной выборке оценим точность прогнозирования построенных моделей как

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \hat{x}_i)^2},$$

где k – объём контрольной выборки; x_i – значение i -го наблюдения процесса; \hat{x}_i – прогнозируемое значение процесса по построенной модели. Результаты сравнения моделей по точности прогнозирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Ошибки прогнозирования при различных моделях.

Модель процесса	Ошибка прогнозирования (σ_{Δ})		
	Процесс 1	Процесс 2	Процесс 3
Авторегрессионная модель цилиндрического изображения (2)	0,6401	0,6561	0,6676
Авторегрессионная модель второго порядка	0,7950	0,7606	0,7756
Гармоническая модель	0,9698	0,9316	0,9532

Из таблицы 1 следует, что при использовании цилиндрических моделей изображений точность прогнозирования динамики процессов вибраций повышается до 1,5 раз по сравнению с авторегрессионной и гармонической моделями.

4. Заключение

Для прогнозирования состояния технических объектов предложено использовать модели квазипериодических процессов в виде развёрток цилиндрических изображений. Результаты численных экспериментов показывают, что использование этих моделей обеспечивает более высокую точность прогнозирования процессов по сравнению с классическими моделями временных рядов.

5. Литература

- [1] Кувайскова, Ю.Е. Информационно-математическая система поддержки принятия решений по управлению объектом на основе прогнозирования его технического состояния / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина, К.А. Федорова // Автоматизация процессов управления. – 2018. – Т. 1, № 51. – С. 67-72.
- [2] Kuvayskova, Y.E. The prediction algorithm of the technical state of an object by means of fuzzy logic inference models // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 767-772. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.624.
- [3] Кувайскова, Ю.Е. Применение адаптивного регрессионного моделирования при описании и прогнозировании технического состояния объекта / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина // Автоматизация процессов управления. – 2016. – Т. 4, № 46. – С. 35-40.
- [4] Крашенинников, В.Р. Обновление моделей прогнозирования состояния объектов в виде систем временных рядов и многомерных классификаторов / В.Р. Крашенинников, Ю.Е. Кувайскова, В.Н. Клячкин, Ю.С. Шунина // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 6. – С. 11-16. DOI: 10.14489/vkit.2017.06.pp.011-016.
- [5] Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г.М. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 242 с.
- [6] Montgomery, D.C. Forecasting and Time Series Analysis / D.C. Montgomery, L.A. Johnson, J.S. Gardiner. – New York: Mc Graw-Hill, 1990. – 394 p.

- [7] Jenkins, G.M. Spectral Analysis and Its Application / G.M. Jenkins, D.G. Watts. – San Francisco: Golden-Day, 1968. – 525 p.
- [8] Krasheninnikov, V.R. Autoregressive Model of a Quasiperiodic Signal / V.R. Krasheninnikov, D.V. Kalinov, Yu.G. Pankratov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – Vol. 11(1). – P. 211-213.
- [9] Крашенинников, В.Р. Прогнозирование динамики объекта с использованием авторегрессионных моделей на цилиндре / В.Р. Крашенинников, Ю.Е. Кувайскова // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 36-39.
- [10] Васильев, К.К. Статистический анализ последовательностей изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – М.: Радиотехника, 2017. – 248 с.
- [11] Krasheninnikov, V.R. Multidimensional Image models and processing / V.R. Krasheninnikov, K.K. Vasil'ev // Intelligent Systems Reference Library. – 2017. – Vol. 135. – P. 11-64.
- [12] Хабиби, А. Двумерная байесовская оценка изображений // ТИИЭР. – 1972. – Т. 60, № 7. – С. 153-159.

Modelling and forecasting of quasi-periodic processes in technical objects based on cylindrical image models

V.R. Krasheninnikov¹, Yu.E. Kuvayskova¹

¹Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets street 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. Accurate forecasting of the state of technical objects is necessary for effective management. The technical condition of the object is characterized by a system of time series of monitored indicators. The time series often have difficultly predictable irregular periodicity (quasi-periodicity). In this paper, to improve the accuracy of such series forecasting, models of quasi-periodic processes in the form of samples of a cylindrical image are used. The application of these models is demonstrated by forecasting of a hydraulic unit vibrations. It is shown that the use of these models provides a higher accuracy of prediction compared with the classical approaches.