

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ АППАРАТУРЫ ЦИФРОВОЙ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА «ГУСЕНИЦА»

Смагин С.А.<sup>1</sup>, Коннов Н.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО "Галактика ПРО", e-mail: [semasmagin@gmail.com](mailto:semasmagin@gmail.com)

<sup>2</sup>ФГБОУ высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет», e-mail: [konnov.nik@gmail.com](mailto:konnov.nik@gmail.com)

---

Рассматривается методика выделения квази-детерминированной и чисто случайных составляющих джиттера информационного сигнала в канале чтения аппаратуры цифровой магнитной записи (ЦМЗ) по экспериментальной реализации временных искажений интервалов информационного сигнала, возможность получения которых обеспечивается оригинальной контрольно-измерительной аппаратурой.

Для обработки реализации используется алгоритм сингулярно-спектрального анализа «Гусеница». Результатом применения алгоритма является разложение исходного временного ряда на простые компоненты: медленные тренды и другие периодические или колебательные составляющие, а также чисто шумовые компоненты. Исследование и анализ этих компонент имеет важное значение для проектирования конструкции электромеханических узлов и схемотехники каналов записи-воспроизведения аппаратуры ЦМЗ.

Эффективность предложенной методики иллюстрируется средствами моделирования коррекции фазового джиттера информационного сигнала системой инерциальной фазовой автоподстройки частоты.

Ключевые слова: джиттер, гусеница, мгновенный джиттер, измерение с пропусками.

---

## TIME DISTORTION SIGNALS ANALYSIS IN DIGITAL MAGNETIC RECORDING CHANNELS USING "CATERPILLAR" ALGORITHM

Smagin S.A., Konnov N.N.

JSC "Galaxy Pro", e-mail: [semasmagin@gmail.com](mailto:semasmagin@gmail.com)

FGBOU of higher education "Penza State University", e-mail: [konnov.nik@gmail.com](mailto:konnov.nik@gmail.com)

---

In this article it is described the implementation method of the temporary distortions intervals of the information signal and allocation of quasi-deterministic and purely random jitter components in the read channel of digital magnetic recording (DMR).

For the implementation process it was used the «Caterpillar» algorithm of singular spectral analysis. As the result of this algorithm we got the decomposition of the initial time series into simple components: slow trends and other periodic or oscillatory components and pure noise components. Research and analysis of these components is significant for the design of Electromechanical units and circuitry channels recording-playing equipment DMR.

The efficiency of the proposed method is illustrated by means of modeling correction phase jitter information signal system inertial phase-locked loop.

Keywords: Jitter, caterpillar, instantaneous jitter, measurement of complementary interval, measurement with gaps.

---

### Введение

Временные и фазовые искажения сигналов информации (джиттер) в каналах записи-воспроизведения (КЗВ) аппаратуры цифровой магнитной записи (накопители на магнитных дисках и лентах) в значительной степени определяют надежность сохранения информации. Поэтому математическое описание джиттера, который вызван совокупным действием многих факторов, носящих в общем случае стохастический характер, имеет важное значение для проектирования конструкции электромеханических узлов накопителей, их каналов записи-воспроизведения, а также контроля [1,2]. Предлагаемый подход к построению модели временных искажений базируется на обработке экспериментальных данных о временных искажениях сигналов в КЗВ, возможность получения которых обеспечивается оригинальной контрольно-измерительной аппаратурой [3].

Будем считать исследуемым временным параметром сигнала в канале НМД его мгновенный период – временной интервал между передними (задними) фронтами информационных импульсов (например, с выхода пикового детектора канала воспроизведения). Мгновенное значение временного интервала определяется:

- кодовой комбинацией, сформировавшей сигналограмму на соответствующем участке носителя;
- амплитудно-частотной характеристикой КЗВ;
- нестабильностью параметров КЗВ (непостоянство линейной скорости носителя и величины рабочего зазора магнитной головки);
- шумами носителя и электронной части КЗВ.

Для того чтобы обеспечить отдельный анализ искажений, вызванных межсимвольной интерференцией и другими дестабилизирующими факторами, измерения временных интервалов проводятся при воспроизведении предварительно записанной на дорожке периодической кодовой последовательности, которая должна формировать все временные интервалы, соответствующие используемому методу канального кодирования, причем желательно записывать их «тяжелую» комбинацию.

Джиттер – сложный процесс, состоящий из множества компонент, которые определяются особенностями работы устройства чтения/записи (биение головки, центробежные силы при вращении дисков, температурный режим эксплуатации устройства и т.п.), но при этом джиттер условно можно разделить на 2 части: 1 – квази детерминированный джиттер; 2 – чисто случайный [4].

Традиционно задачи построения моделей временных рядов состоят из следующих этапов:

- выделение квази-детерминированной компоненты в виде тренда и интерпретация его как низкочастотной составляющей;
- приведение процесса к стационарному;
- построение линейной модели стационарного процесса.

Для описания квази-детерминированной компоненты обычно используется аналитический подход, основанный на некотором эвристическом предположении о его характере. Например, в [5] для аппроксимации тренда используются полиномы Чебышева. В любом случае, выделение квази-детерминированных компонент связано с основанным на опыте исследователя выбором вида уравнения, размерности полиномов и оценки их значений для каждой реализации, что является достаточно ресурсоемким процессом.

В отличие от традиционного подхода, в настоящей работе предлагается применить для выделения квази-детерминированных и чисто случайных компонент джиттера алгоритм «Гусеница» [6, 7], суть которого в преобразовании одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры (отсюда и название «Гусеница») и

исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения) с последующим восстановлением ряда по выбранным главным компонентам. Результатом применения алгоритма является разложение исходного временного ряда на простые компоненты: медленные тренды и другие периодические или колебательные составляющие, а также чисто шумовые компоненты.

### Формирование исходных данных

Основой для построения модели квази-детерминированной компоненты джиттера служит временной ряд, описывающий поведение мгновенного периода информационного сигнала в канале КЗВ.

Последовательность измерений синхронизируется таким образом, чтобы измерялись временные интервалы, соответствующие одноименным позициям воспроизводимой кодовой последовательности.

В связи с высокой скоростью работы накопителя и относительно низкой производительностью ( $10^7$  измерений/сек) при высокой разрешающей способности (0.82 нс) измерителя получены данные не о каждом мгновенном периоде (рисунок 1).

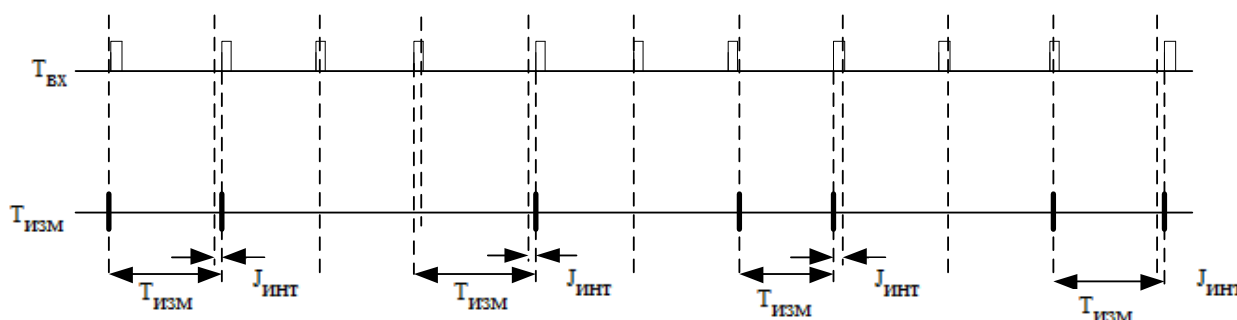


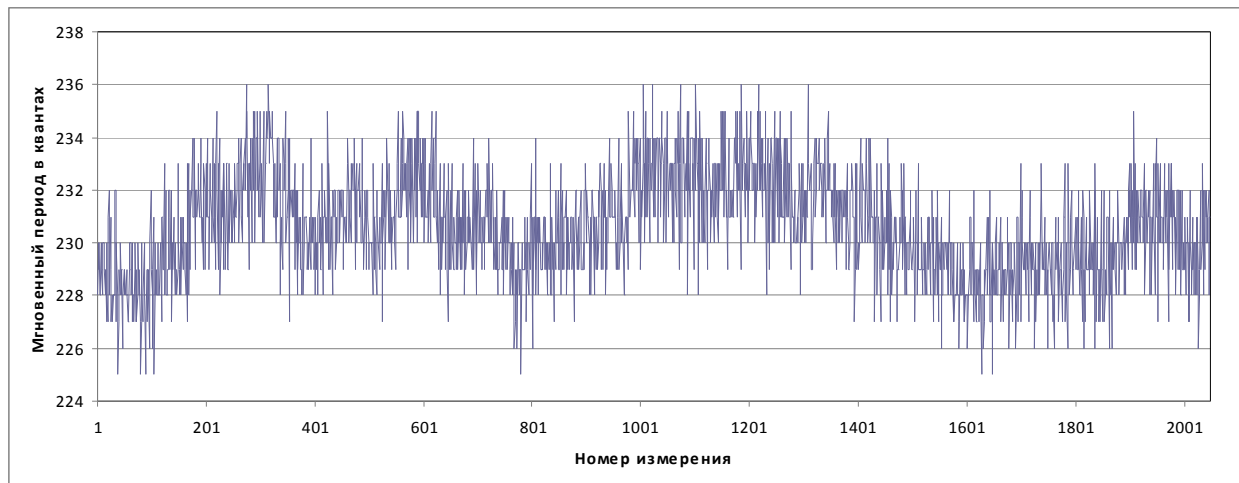
Рисунок 1. Измерение не смежных временных интервалов.

### Построение модели джиттера с использованием алгоритма «Гусеница»

Для построения модели квази-детерминированного джиттера в каналах чтения/записи НМД автором предложен следующий алгоритм:

#### Шаг 1. Вычисление интервального джиттера

На рисунке 2 представлена измеренная реализация мгновенных периодов ( $T_{ИЗМ}$ ) информационного сигнала КЗВ, выраженная в квантах измерителя, по оси абсцисс указан номер измерения, по оси ординат длительность мгновенного периода. Периодичность измерений периодов – 2760.



**Рисунок 2. Исходные данные**

Вычисление интервального джиттера выполняется по формуле:

$$J_{\text{ИНТ}} = T_{\text{ИЗМ}} - \text{mean}(T_{\text{ИЗМ}}) \quad ((1))$$

Временной ряд, определяемый как отклонение мгновенного периода от его среднего значения, полученный по формуле (2), является исходными данными для гусеницы.

$$J_{\text{ВЗ}} = \frac{J_{\text{ИНТ}}}{\text{mean}(T_{\text{ИЗМ}})} \quad ((2))$$

Как было показано в работе [8], восстановление информации о квази-детерминированной компоненте джиттера на пропущенных интервалах предпочтительнее выполнять после выделения квази-детерминированной компоненты «Гусеницей».

***Шаг 2. Восстановление квази-детерминированной компоненты джиттера с использованием «Гусеницы»***

Алгоритм метода «Гусеница» можно разделить на несколько этапов.

1.1. Вложение. Выполняется преобразование исходного ряда в последовательность  $L$ -мерных векторов, число которых равно  $K = N - L + 1$ :

$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T$ ,  $1 \leq i \leq K$ , где  $N$  – длина временного ряда,  $L$  – длина окна «Гусеницы»

2. Сингулярное разложение. Результатом этого шага является сингулярное разложение траекторной матрицы ряда:

$V_i = X^T U_i / \sqrt{\lambda_i}$  ( $i = 1, \dots, d$ ), где  $\lambda_1, \dots, \lambda_L$  собственные числа матрицы  $S = XX^T$ , взятые в порядке убывания ( $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ );  $U_1, \dots, U_L$  – ортонормированная система собственных векторов матрицы  $S$ , соответствующих собственным числам  $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ .

В результате преобразований получим разложение траекторной матрицы:

$$X = X_1 + \dots + X_d, \text{ где } X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$$

3. Группировка. Выбрав интересующие нас компоненты, выполним процедуру группировки. Для группировки и восстановления ряда рекомендуется брать первые 2–3 компоненты, т.к. остальные представляют собой реализацию «белого шума».

4. Диагональное усреднение. На последнем шаге каждая матрица сгруппированного разложения переводится в новый ряд длины  $N$  по формуле

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{j=1}^{k+1} z_{j,k-j+2} & \text{для } 0 \leq k < L^* - 1, \\ \frac{1}{L^*} \sum_{j=1}^{L^*} z_{j,k-j+2} & \text{для } L^* - 1 \leq k < K^*, \\ \frac{1}{N-k} \sum_{j=k-K^*+2}^{N-K^*+1} z_{j,k-j+2} & \text{для } K^* \leq k < N. \end{cases}$$

где  $z = X_{l_1} + \dots + X_{l_m}$

Таким образом, результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды и периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты.

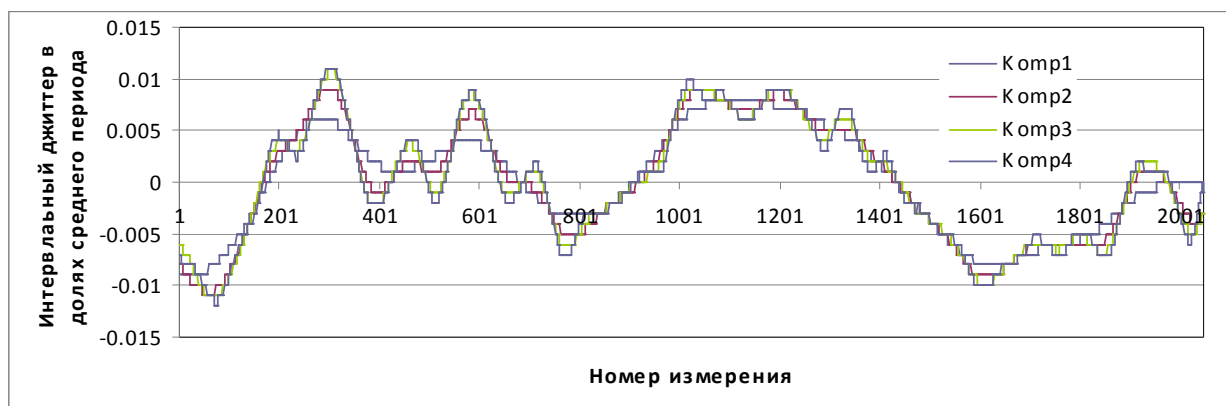
Полученное разложение служит основой прогнозирования как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

Анализируя поведение компонент, полученных при различной длине окна гусеницы, было определено, что данный временной ряд удовлетворительно описывает реализация «Гусеницы» при длине окна  $L = 128$ . В таблице 1 приведены удельные веса первых 4 компонент «Гусеницы»

**Таблица 1. Удельный вес компонент «Гусеницы»**

Номер компоненты «Гусеницы»	Удельный вес компоненты, %
1	34,226
2	6,129
3	2,230
4	1,051

На рисунке 3 показано, как изменяется квази-детерминированная компонента интервального джиттера в зависимости от числа выбранных компонент: Komp1 – одна компонента; Komp2 – две компоненты; Komp3 – три компоненты; Komp4 – четыре компоненты.



**Рисунок 3. Реализации квази-детерминированной компоненты интервального джиттера**

#### **Анализ остатка после обработки сигнала «Гусеницей»**

Оставшаяся часть ряда, которая была отброшена на этапе группировки существенных компонент «Гусеницы», подчиняется закону нормального распределения, что подтверждается критерием Колмогорова – Смирнова и гистограммой распределения.

#### **Шаг 3. Интерполяция значений квази-детерминированного джиттера на пропущенные интервалы**

Для восстановления информации на пропущенных временных интервалах применим механизм интерполяции 0-го порядка, тогда:

$$J_{\text{восст}_k} = \text{Komp4}_i, 0 \leq i \leq n, \text{ где } n = 12 - \text{количество пропущенных интервалов измерений;}$$

$\text{Komp4}_i$  - джиттер  $i$ -го измеренного интервала.

Полученная квази-детерминированная компонента интервального джиттера представляет самостоятельный интерес для конструкторов и технологов, поскольку несет информацию о влиянии на информационный сигнал электро-механических узлов НМД.

Для оценки поведения селектора информации необходимо вычислить квази-детерминированную компоненту фазового джиттера, который определим как отклонение временного положения информационного сигнала от его положения на идеальной шкале синхросигнала.

В существующих системах, для выделения данных из информационного сигнала применяется его стробирование синхросигналом, формируемым инерциальной системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая позволяет убрать из поступающего сигнала низко-частотные компоненты, которые могут привести к ошибке из-за их накопления [9].

#### Шаг 4. Переход от интервального джиттера к фазовому

Для перехода к фазовому джиттеру можно воспользоваться следующей формулой:

$$Jph_k = \sum_{i=0}^k J_{ВОССТi} \quad (4)$$

На рисунке 4 представлен график поведения квази-детерминированной компоненты джиттера в каналах чтения записи НМД



**Рисунок 4. График квази-детерминированной фазовой компоненты джиттера**

Рассмотрим возможность коррекции полученного фазового джиттера системой инерциального ФАПЧ, для этого воспользуемся моделью простейшего ФАПЧ, описанной в [10], и определим его следующие параметры:

- коэффициент фазового детектора  $K_d = 1$ ;
- коэффициент генератора управляемого напряжением  $K_0 = 1$ ;
- резонансная частота контура  $\omega_r = 50 * 2\pi$ ;
- демпинг фактор  $\varepsilon = 0.5$ ;
- частота дискретизации  $F_s = 10000$  Гц.

Пропустив квази-детерминированную компоненту «Гусеницы» через фильтр, мы получим ошибку, которую фильтр не убрал из исходного сигнала.

На рисунке 5 представлены гистограммы распределения ошибки ФАПЧ и общей ошибки

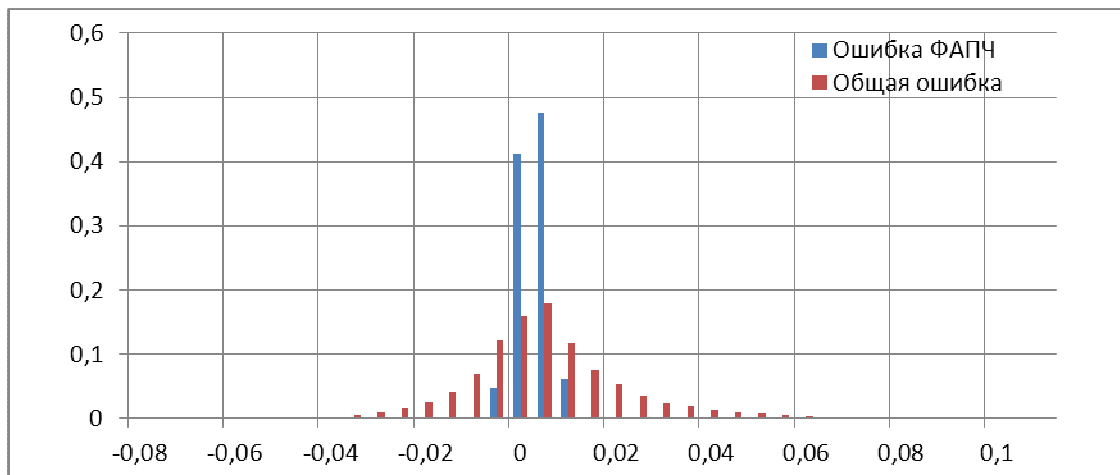


Рисунок 5. Гистограмма распределения ошибки

Область допустимых значений фазовых искажений в накопителе (нормирования) определяется, исходя из условия обеспечения требуемой достоверности воспроизведения записанной периодической байтовой последовательности, соответствующей «тяжелому» коду, при котором наибольшая межсимвольная интерференция.

### Заключение

Метод «Гусеница» позволяет выделять квази детерминированную составляющую джиттера при отсутствии априорной информации о его структуре и различной полноте измерений (пропусков в реализации сигнала) и оценивать величину квази-детерминированной компоненты на каждом тактовом интервале, вне зависимости от того, проводилось ли его измерение.

### Список литературы

1. Коннов Н.Н., Попов К.В., Дятлов Л.Е. Контроль и нормирование параметров временных и фазовых искажений сигналов в каналах НМД /: Вычислительная техника в автоматизир. системах контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 23. – Пенза: Изд-во ПГТУ, 1995. – С. 42-50.
2. Чулков, В.А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации: Монография / В.А. Чулков. – М.: Физматлит, 2010. – 328 с.
3. Гурин Е.И., Дятлов Л.Е., Коннов Н.Н., Попов К.В. Севастьянов А.В. Нониусный измеритель временных интервалов на ПЛИС // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С.44-48.
4. Смагин С.А. О применении метода «Гусеница» для выделения квазидетерминированной компоненты джиттера в каналах связи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 37-46.



5. Коннов Н. Н., Попов К. В. Принципы построения моделей искажений сигналов в системах передачи и хранения информации // Вычислительная техника в автоматизированных системах контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 24. – Пенза: Изд-во ПГТУ, 1996. – С. 50-58.
6. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. – СПб.: Пресском, 1997. – 307 с. <http://www.gistatgroup.com/gus/>.
7. Смагин С.А. Оценка фазового джиттера при измерениях не смежных интервалов // Труды 1-й международной научно-практической Интернет-конференции. – Пенза, 2010. – С. 379-381.
8. Смагин С.А., Коннов Н.Н. Выделение неслучайных компонент джиттера с использованием алгоритма «Гусеница» / Новые информационные технологии и системы: Труды VIII Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПГУ, 2008. – С. 197-200.
9. Чулков В.А., Смагин Ю.А. Схемотехника внешних запоминающих устройств: элементы и узлы. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1997. – 116 с.
10. Контур фазовой автоподстройки частоты и его основные свойства / <http://www.dsplib.ru/content/pll/pll.html>

#### **Рецензенты:**

Цыпин Б.В., д.т.н., профессор кафедры ИИТ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Чулков В.А., д.т.н., профессор, декан факультета заочного обучения Пензенского государственного технологического университета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза.