

УДК 681.51 (075.4)

## **ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ХРОНОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ\***

***В.Н. Яшин, А.Е. Колоденкова***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.*** Рассматриваются вопросы, связанные с применением аппарата корреляционных и спектральных функций для диагностики технических средств хронометрии, а также с применением информационных технологий для автоматизации процессов нахождения, построения и анализа корреляционных и спектральных функций. Сформулированы основные подходы, позволяющие проводить диагностику технических средств хронометрии, в частности механического хронометра, на основе применения аппарата корреляционных и спектральных функций, а также использования средств информационных технологий для автоматизации процессов нахождения статистических характеристик. На основе анализа существующих методов и средств диагностики технических средств предложен метод диагностики технических средств хронометрии, основанный на формировании информационных моделей, привязанных к определенным дефектам механического хронометра.

***Ключевые слова:*** диагностика, технические средства хронометрии, погрешность измерения, интервалы времени, корреляционная функция, спектральная функция.

### **Введение**

Аппарат корреляционных и спектральных функций широко используется в научных исследованиях и практической деятельности для анализа различных процессов: информационных, технологических, физиологических и т. д. С его помощью становится возможным решение многих важных научно-технических задач: выявление статистической связи между отдельными отсчетами случайных процессов [1–5]; выявление периодических составляющих, присутствующих в случайном процессе [6, 7]; выявление стационарности случайных процессов в широком и узком смысле [1, 2, 8, 9]; анализ знака значений корреляционной функции [9]; изучение смеси случайного и детерминированного процессов (сигнал/шум) [2, 3, 7]; построение оптимальных фильтров, отклик которых представляет собой корреляционную функцию входного сигнала [10, 11]; проведение частотного анализа исследуемого процесса [8, 12, 13, 19, 20]; диагностика различных технических средств [14, 15] и ряда других задач. При этом если на теоретическом уровне общие алгоритмы нахождения и анализа корреляционных и спектральных функций достаточно хорошо освещены в соответствующей отечественной и зарубежной литературе [1–13], то вопросам автоматизации их нахож-

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00152.

Яшин Владимир Николаевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Колоденкова Анна Евгеньевна (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Информационные технологии».

дения, построения и анализа с помощью современных информационных технологий для диагностики технических средств хронометрии (ТСХ) уделено значительно меньше внимания. ТСХ [16] представляют собой технические средства получения, отображения, обработки или передачи на расстояние хронометрической информации, которая, в свою очередь, означает измерительную информацию, получаемую в результате измерения интервалов времени. Измерение интервалов времени с помощью ТСХ представляет собой реальный физический процесс, зависящий как от метрологических характеристик ТСХ, так и от внешних воздействий.

### **Постановка и пути решения задачи**

Целью работы является реализация метода быстрого (оперативного) процесса диагностирования дефектов ТСХ средствами информационных технологий, позволяющими автоматизировать процесс диагностики ТСХ.

В качестве объекта исследования рассмотрен механический хронометр, являющийся разновидностью ТСХ; при этом учитывалось, что полученные результаты исследования могут быть использованы и для других видов ТСХ.

Механический хронометр является сложным механическим устройством для измерения временных интервалов и относится к классу измерительных приборов. Механический хронометр состоит из достаточно большого количества деталей, входящих в соответствующие узлы: осциллятора, системы привода и системы освобождения, зубчатой передачи, двигателя и т. д. Дефекты, возникающие в механическом хронометре, приводят к функциональным и метрологическим отказам.

Функциональные отказы связаны в первую очередь с некачественным изготовлением деталей хронометра, обусловленным технологическими нарушениями в процессе производства. Функциональные отказы и связанные с ними дефекты достаточно просто обнаруживаются при входном контроле деталей и контроле качества сборки механизма хронометра. Однако и здесь имеются проблемы из-за возникновения при контроле ошибок первого и второго рода [13].

Метрологические отказы присущи всем средствам измерения, в том числе и механическим хронометрам. Фиксируются метрологические отказы тогда, когда гарантированная погрешность измерения выходит за пределы допуска [14]. Причиной таких отказов в механических хронометрах являются скрытые дефекты. К таким дефектам в первую очередь можно отнести старение деталей, обусловленное физико-химическими процессами, протекающими в них, а также дефекты, связанные с неправильной регулировкой механизма хронометра. Выявить такие дефекты достаточно сложно, что подчеркивает актуальность решения данной задачи.

В статье предлагается к рассмотрению метод, позволяющий идентифицировать ряд дефектов, приводящих к метрологическим отказам механических хронометров, и автоматизировать процесс диагностики средствами информационных технологий.

### **Общие сведения**

Процесс измерения интервалов времени в механическом хронометре можно описать, например, с помощью математической модели вида

$$T_n = T_{\text{нач}} + \sum_{j=1}^n T_j,$$

где  $T_{\text{нач}}$  – начальное показание механического хронометра;  
 $T_n$  – конечное показание механического хронометра в точке  $n$  конца измерения;  
 $j = 1, 2, \dots, n$ .

Приведенная выше математическая модель описывает процесс суммирования интервалов времени (показаний) механического хронометра в некоторой конечной точке  $n$  и в данном случае не учитывает погрешность измерений хронометра. Для механического хронометра как средства измерения интервалов времени погрешность измерения можно представить в следующем виде:

$$\Delta_i = T_i - T_n,$$

где  $T_i$  – текущий период колебания осциллятора механического хронометра;  
 $T_n$  – номинальный период колебания осциллятора эталонной хронометрической системы,  $i = 1, 2, \dots$ .

Погрешность измерений  $\Delta_i$  является дискретной функцией; кроме того, значения  $\Delta_i = T_i - T_n$  являются первыми приращениями значений  $T_i$ ,  $T_n$  и характеризуют абсолютную погрешность измерения интервалов времени механического хронометра. Погрешность измерения интервалов времени является важнейшей метрологической характеристикой любой хронометрической системы. Для оценки погрешности измерений  $\Delta_i$  на практике используются разные способы: фотоэлектрические, акустические, оптические и т. д. В данной статье данные для оценки  $\Delta_i$  были получены с помощью акустического способа [15]. Механический хронометр устанавливался на пьезоэлектрический датчик с формирователем импульсов, который преобразовывал звуковые (акустические) шумы, возникавшие при функционировании спускового механизма хронометра, в электрические сигналы с периодом, пропорциональным текущему периоду колебания осциллятора механического хронометра.

Дискретная функция  $\Delta_i$  представляет собой дискретный случайный процесс [9, 17, 18], который обладает свойствами стационарности, в отличие от последовательности значений  $T_i$ , которые этим свойством не обладают. По этой причине статистические оценки, получаемые при обработке значений  $\Delta_i$ , не зависят от времени, т. е. являются стационарными и могут быть подвергнуты статистическому анализу с использованием средств информационных технологий для автоматизации самого анализа.

В ходе такого анализа может быть выявлена стационарность данного процесса в «широком» или «узком» смысле, определена дисперсия процесса, позволяющая указать некоторые вполне определенные границы для дисперсий при наличии ярко выраженных дефектов в механическом хронометре, а также получены корреляционные и спектральные функции, дающие более детальную оценку характера случайного процесса  $\Delta_i$ . Следует также отметить, что в случае отсутствия стационарности в широком смысле слова функции  $\Delta_i$  можно использовать стационарные функции более высоких порядков  $\Delta_{2i}$ ,  $\Delta_{3i}$  и т. д. Данные функции являются вторыми, третьими и т. д. приращениями функции  $\Delta_i$  [14].

### **Методы решения поставленной задачи**

В статье предложен метод, позволяющий идентифицировать ряд дефектов механизма хронометра, приводящих к его метрологическим отказам, и автоматизировать процесс диагностики средствами информационных технологий. Реали-

зацией данного метода является разработанная методика идентификации дефектов.

В отличие от прямых методов диагностики, когда для выявления дефектов необходимо вскрывать корпус механического хронометра, предлагается к рассмотрению косвенный метод, позволяющий производить диагностику с помощью ряда информационных характеристик. Основной информационной характеристикой для получения в дальнейшем статистических характеристик, используемых при диагностировании дефектов в механическом хронометре, была выбрана дискретная функция  $\Delta_i$ . Выбор данной функции был обусловлен причинами, описанными ранее.

Рассмотрим несколько возможных случаев изменения функции  $\Delta_i$  от отсчетов времени  $i$ , которые можно принять в качестве информационных моделей поведения функции  $\Delta_i$  на интервале измерения. Кроме того, для решения поставленной задачи, т. е. идентификации дефектов, установим зависимость между предполагаемой теоретической моделью поведения этой функции и конкретным дефектом.

1.  $\Delta_i > 0$  на интервале измерения, функция принимает значение, равное  $\Delta_i = a = \text{const}$ .

В этом случае  $T_i > T_n$  и показания механического хронометра отстают по времени от показаний эталонного хронометра. Отставание в конце интервала измерения  $0-n$  ( $n$  – отсчетов времени, значение  $n$  принималось равным 30) составит  $\Omega_n = a \cdot n$ , т. е. погрешность измерения интервала времени будет нарастать по линейному закону. Данная модель характерна для дефекта механического хронометра, который является следствием неправильной регулировки механизма хронометра и подтверждается оценкой на ее адекватность данному дефекту. Так, для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась неправильной регулировке механизма, т. е. механизмы хронометров были установлены на отставание во времени относительно эталонного измерителя интервалов времени, а затем проводились измерения  $\Omega_n$  в конце интервала измерения. Для оценки адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту сравнивались теоретические и экспериментально полученные значения  $\Omega_n$ . При совпадении теоретических и экспериментальных значений  $\Omega_n$  принималось решение об адекватности модели.

2.  $\Delta_i > 0$  на интервале измерения  $0-n$ , функция принимает положительные переменные значения, подчиняясь некоторому периодическому закону, например

$\Delta_i = a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a$ , где  $k$  – период функции  $\sin \frac{2\pi i}{k}$ . В этом случае будет также

выполняться условие  $T_i > T_n$  и механический хронометр будет отставать по времени от эталонного хронометра, но отставание будет носить переменный характер и погрешность составит в конце интервала времени  $0-n$  величину, равную

$$\Omega_n = \left( a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a \right) \frac{n}{k}.$$

Данная теоретическая модель поведения функции  $\Delta_i$  характерна для дефекта, проявляющегося в виде незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра. Для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась испытаниям с заранее установленным дефектом в виде незначительного повреждения анкерного колеса. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично предыдущему случаю.

3.  $\Delta_i > 0$  на интервале измерения 0- $n$ , функция  $\Delta_i$  принимает положительные переменные значения на интервале, подчиняясь некоторому случайному закону. В этом случае также выполняется условие  $T_i > T_n$  и механический хронометр отстает по времени от эталонного хронометра, но отставание носит случайный характер. В случае стационарности этого процесса значение погрешности в конце интервала времени 0- $n$  будет равно  $\Omega_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i + a$ .

Значения  $\Delta_i$  для построения такой модели выбирались случайным образом, с помощью генератора случайных чисел; полученные значения  $\Delta_i$  подчинялись нормальному закону распределения вероятностей.

Данная теоретическая модель поведения функции  $\Delta_i$  характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра. Для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась испытаниям с заранее установленным дефектом, который проявлялся в виде биения анкерного колеса. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично предыдущему случаю.

4.  $\Delta_i = 0$  на интервале измерения 0- $n$ .

В этом случае  $T_i = T_n$  и показания механического хронометра равны показаниям эталонного хронометра (идеальный случай), т. е. дефекты отсутствуют.

5.  $\Delta_i < 0$  на интервале измерения 0- $n$ , функция принимает значение  $\Delta_i = -a = \text{const}$ . В этом случае  $T_i < T_n$  и показания механического хронометра опережают показания эталонного хронометра. При этом опережение в конце интервала 0- $n$  составит  $\Omega_n = -a \cdot n$ . Данный дефект так же, как и в первом случае, является следствием неправильной регулировки механизма хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично первому рассмотренному случаю.

6.  $\Delta_i < 0$  на интервале измерения 0- $n$ , функция может принимать переменные значения, подчиняясь некоторому детерминированному закону, например

$\Delta_i = -\left(a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a\right)$ , при этом механический хронометр «опережает» по времени эталонный хронометр, но опережение носит переменный (гармонический) характер и составит в конце интервала времени 0- $n$  величину, равную

$$\Omega_n = -\left(a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a\right) \frac{n}{k}.$$

Данный дефект так же, как и во втором случае, является следствием незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично второму рассмотренному случаю.

7.  $\Delta_i < 0$  на интервале измерения 0- $n$ , функция может принимать переменные значения на интервале, подчиняясь некоторому случайному закону. При этом будет выполняться условие  $T_i < T_n$  и механический хронометр будет опережать по времени эталонный хронометр, но это опережение носит случайный характер. В случае стационарности этого процесса погрешность в конце интервала времени 0- $n$  будет равна  $\Omega_n = -\sum_{i=1}^n \Delta_i - a$ .

Данная теоретическая модель поведения функции  $\Delta_i$  характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Значения  $\Delta_i$  для построения такой модели выбирались случайным образом, с помощью генератора случайных чисел; полученные значения  $\Delta_i$  подчинялись нормальному закону распределения вероятностей. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично третьему рассмотренному случаю.

8.  $0 < \Delta_i < 0$  на интервале измерения  $0-n$ , функция  $\Delta_i$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения. При этом закон изменения функции  $\Delta_i$  может подчиняться некоторому детерминированному закону, например

$$\Delta_i = a \sin \frac{2\pi i}{k}, \text{ т. е. механический хронометр за один период будет отставать}$$

от эталонного, а за другой – опережать его, но опережение или отставание будет носить переменный (гармонический) характер и составит в конце интервала вре-

мени  $0-n$  величину, равную  $\Omega_n = \left( a \sin \frac{2\pi i}{k} \right) \frac{n}{k}$ . При этом если укладывается целое

число периодов  $k$  на интервале  $0-n$ , то  $\Omega_n = 0$ , в противном случае  $\Omega_n$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Данная теоретическая модель поведения функции  $\Delta_i$  характерна для дефекта, проявляющегося в виде неправильной установки палеты анкерного колеса механического хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично второму и пятому рассмотренным случаям.

9.  $0 < \Delta_i < 0$  на интервале измерения  $0-n$ , функция может принимать как положительные, так и отрицательные значения, подчиняясь некоторому случайному закону. При этом механический хронометр внутри интервала измерения может как опережать по времени эталонный хронометр, так и отставать от него, но это опережение или отставание будет носить случайный характер. В случае стационарности этого процесса значение погрешности в конце интервала времени

$0-n$  будет равно  $\Omega_n = \sum_{i=1}^m \Delta_i - \sum_{i=1}^{n-p} \Delta_i$ , где  $p$  – число отсчетов  $\Delta_i$ , принявших поло-

жительные значения.

Данная теоретическая модель поведения функции  $\Delta_i$  характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Значения  $\Delta_i$  для построения такой модели выбирались случайным образом с помощью генератора случайных чисел, полученные значения  $\Delta_i$  подчинялись нормальному закону распределения вероятностей. Оценка адекватности модели поведения функции  $\Delta_i$  установленному дефекту проводилась аналогично третьему рассмотренному случаю.

Рассмотренные выше теоретические модели поведения функции  $\Delta_i$  от отсчетов времени  $i$  позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1. Отличие моделей 1–3, 5–9 от модели 4 свидетельствует о наличии дефектов в механизме хронометра, которые приводят к метрологическим отказам.

2. Установлена связь между определенным видом модели и конкретным дефектом на основе экспериментальных исследований.

3. Рассмотренные модели поведения функции  $\Delta_i$  от отсчетов времени  $i$  можно принять в качестве базовых моделей при нахождении, построении и анализе корреляционных и спектральных функций.

4. Количество моделей не является окончательным и может быть расширено, что позволит в дальнейшем выявлять скрытые дефекты и прогнозировать их появление.

### Построение графиков корреляционных и спектральных функций

Как уже отмечалось, предлагается к рассмотрению косвенный метод, позволяющий производить диагностику с помощью ряда информационных характеристик: среднего ожидания функции  $\Delta_i$ , дисперсии  $\Delta_i$ , корреляционной и спектральных функций.

Определим средние значения и дисперсии, а также построим графики корреляционных и спектральных функций для ранее рассмотренных моделей поведения функции  $\Delta_i$  от отсчетов времени  $i$ .

Для автоматизации процесса нахождения средних значений, дисперсий, корреляционных и спектральных функций, а также построения графиков корреляционных и спектральных функций используем средства информационных технологий: язык программирования *VBA (Visual Basic for Application)* в среде *Microsoft Excel* (лента «Разработчик»).

Для нахождения перечисленных характеристик – среднего значения погрешности  $\Delta_{cp}$ , дисперсии  $D$ , нормированной корреляционной функции  $K$  и спектральной функции  $C$  – применим следующие формулы [1–7]:

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad D = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n \Delta_i \right)^2}{n} \right], \quad K_i = \frac{\sum_{j=1}^{n-i} (\Delta_j - \Delta_{cp})(\Delta_{j+i} - \Delta_{cp})}{(n-i) D},$$

$$C_i = \frac{1}{m+1} \left[ 0,5K(0) + \sum_{j=1}^{m-1} K(j) \cos \frac{j\pi}{m} i + 0,5K(m)(-1)^m \right],$$

где  $n$  – интервал задания функции  $\Delta_i$ ;  
 $m$  – интервал определения корреляционной функции;  
 $C_i$  – энергия;  
 $i$  – гармоники.

Для нахождения спектральной функции (спектральной плотности мощности) по известной корреляционной функции применялось дискретное преобразование Фурье.

Рассчитанные по выше приведенной формуле значения спектральной плотности мощности для получения уточненных значений  $C_i$  сглаживались с помощью интерполяционных полиномов по формуле [9, 10]

$$\tilde{C}_i = \frac{C_{i-1} + 2C_i + C_{i+1}}{4}.$$

За исходные параметры при нахождении и построении указанных выше статистических характеристик были приняты следующие: период колебания механического хронометра  $T_n = 400000$  мкс, число отсчетов  $n = 30$ .

Для первой модели значение параметра  $a$  принималось равным 10 мкс, т. е.  $\Delta_i = a = 10$  мкс. В этом случае среднее значение погрешности будет равно

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 10 \text{ мкс}, \text{ дисперсия будет равна}$$

$$D = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n a^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n a \right)^2}{n} \right] = \frac{1}{n-1} \left( a^2 n - \frac{a^2 n^2}{n} \right) = 0,$$

нормированная корреляционная функция будет равна  $K_i=1$ , спектральная функция  $C_i=0$ . Полученные расчетным путем значения характеристик свидетельствуют о наличии регулировки механизма хронометра.

Для второй модели, когда  $\Delta_i$  представляет детерминированную функцию, аппарат корреляционных и спектральных функций может быть формально применен к ней. Это в дальнейшем позволит с помощью корреляционных и спектральных функций выявить периодические составляющие, присутствующие в случайном стационарном процессе  $\Delta_i$ , и значительно повысить их роль при обнаружении многих дефектов в механическом хронометре, приводящих к метрологическим отказам.

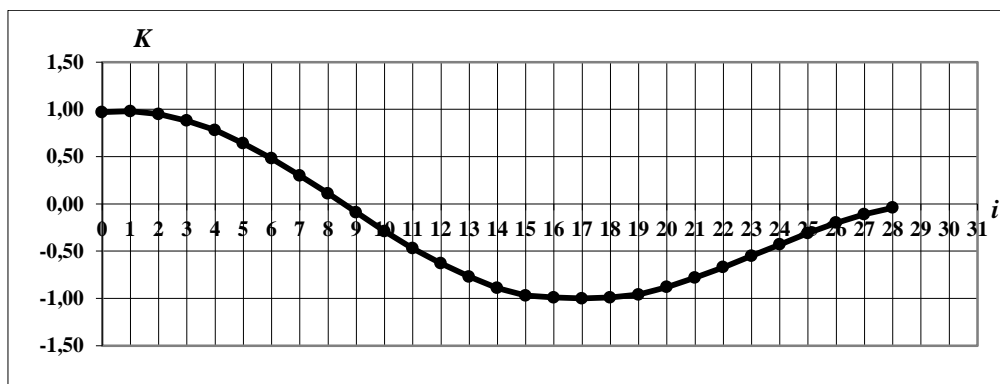


Рис. 1. График функции  $K_i$

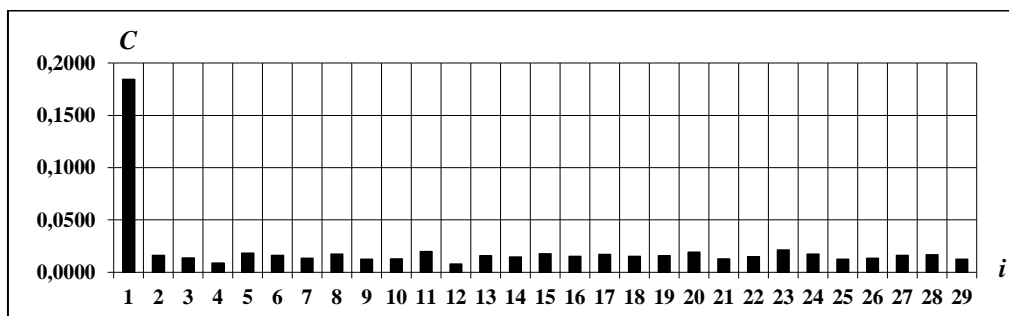


Рис. 2. График функции  $C_i$



При условии, что  $a = 10$  мкс, найдем среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = 20$  мкс и дисперсию  $D = 51,75$  мкс<sup>2</sup>; нормированная корреляционная и спектральная функции, вычисленные по вышеприведенным формулам и представленные в виде графиков, построенных с помощью средств информационных технологий, будут иметь вид, показанный на рис. 1 и 2.

Полученный график корреляционной функции  $K_i$  показывает детерминированный характер исходной функции  $\Delta_i$ , что также подтверждается графиком функции  $C_i$ , т. е. в спектре преобладает одна гармоника. Вид этих графиков характерен для дефекта, проявляющегося в виде незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра.

Для третьей рассмотренной ранее модели при  $a = 10$  мкс среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = 24,83$  мкс, дисперсия  $D = 9,97$  мкс<sup>2</sup>; вычисленные и представленные в виде графиков нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, показанный на рис. 3 и 4.

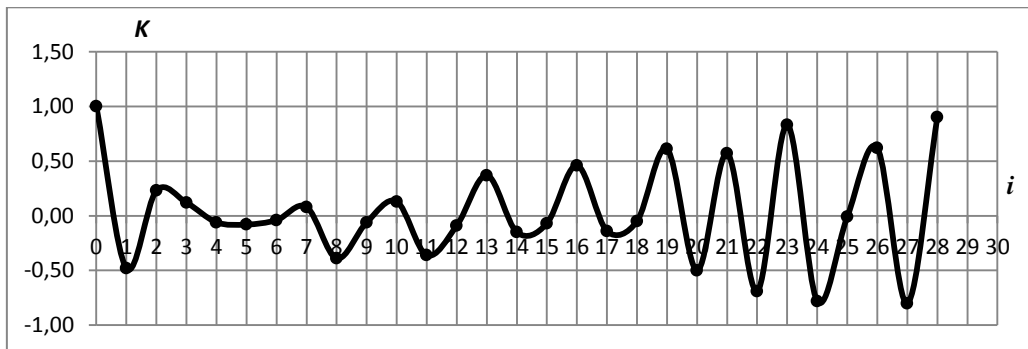


Рис. 3. График функции  $K_i$

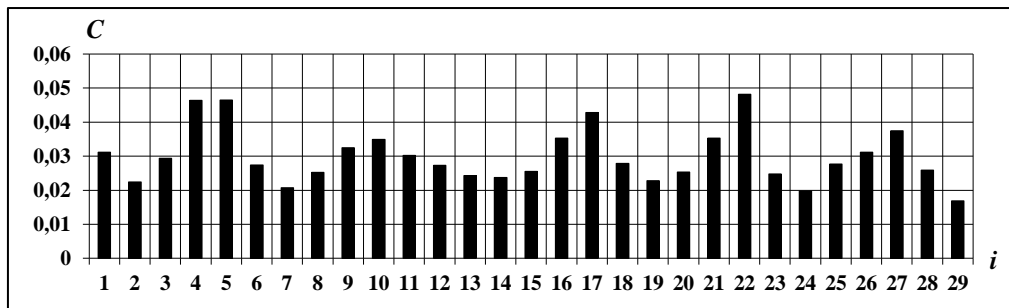


Рис. 4. График функции  $C_i$

Полученный график корреляционной функции  $K_i$  показывает наличие некоторой периодичности, при этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности  $C_i$  показывает относительную их равномерность, что характерно для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Для четвертой рассмотренной модели среднее значение погрешности будет равно  $\Delta_{\text{ср}} = 0$  мкс, дисперсия равна  $D = 0$ , нормированная корреляционная функция будет  $K_i = 1$ , спектральная функция  $C_i = 0$ , что свидетельствует об отсутствии дефектов в механическом хронометре.

Для пятой модели значение параметра  $a$  примем равным 10 мкс, т. е.  $\Delta_i = -a = -10$  мкс, тогда среднее значение погрешности будет равно  $\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = -10$  мкс, дисперсия будет равна  $D = 0$ , нормированная корреляционная функция  $K_i = 1$ , спектральная функция  $C_i = 0$ . Полученные значения характеристик будут свидетельствовать о неправильной регулировке механизма хронометра.

Для шестой модели при условии  $a = 10$  мкс среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = -20$  мкс, дисперсия  $D = 51,75$  мкс<sup>2</sup>, нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 1 и 2.

Вычисленный и построенный график корреляционной функции  $K_i$  показывает ее детерминированный характер, что подтверждается графиком  $C_i$ , т. е. преобладает в спектре одна гармоника. Вид этих графиков также характерен для дефектов, проявляющихся в виде незначительного повреждения анкерного колеса и палеты механического хронометра.

Для седьмой из рассмотренных моделей среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = -14,97$  мкс, дисперсия  $D = 8,72$  мкс<sup>2</sup>, рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 3 и 4.

Построенный график корреляционной функции  $K_i$  показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии некоторых гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности  $C_i$  показывает относительную их равномерность, что характерно для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Для восьмой модели при условии  $a = 10$  мкс среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = 0,67$  мкс, дисперсия  $D = 78,81$  мкс<sup>2</sup>, рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 1 и 2.

Построенный график корреляционной функции  $K_i$  показывает ее детерминированный характер, что подтверждается также графиком  $C_i$ , т. е. преобладает в спектре одна гармоника. Однако дисперсия будет превосходить значения, характерные для второго и шестого случаев, и в спектре амплитуда частотных составляющих будет превосходить амплитуду частотных составляющих для второй и шестой моделей. Вид этих графиков будет характерен для дефекта палеты механического хронометра.

Для девятой модели среднее значение  $\Delta_{\text{ср}} = 1,89$  мкс, дисперсия  $D = 41,26$  мкс<sup>2</sup>, рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 3 и 4.

Построенный график корреляционной функции  $K_i$  показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция, так же как в третьем и седьмом случаях, не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии некоторых гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности  $C_i$  показывает относительную их равномерность, что характерно также для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Как уже отмечалось, ранее рассмотренные теоретические модели изменения функции  $\Delta_i$ , привязанные к конкретным дефектам, не являются исчерпывающими. Однако эти модели можно принять за основу при составлении библиотеки возможных моделей и связанных с ними дефектов. Найденные для таких моделей корреляционные и спектральные функции, представленные в виде графиков, могут выступать в качестве шаблонов (масок) при идентификации дефектов механического хронометра. Для более детальной диагностики механического хронометра или при отсутствии стационарности в широком смысле слова функции  $\Delta_i$  можно использовать стационарные функции более высоких порядков  $\Delta_{2i}$ ,  $\Delta_{3i}$  и т. д. Данные функции являются вторыми, третьими и т. д. приращениями функции  $\Delta_i$  и подробно рассмотрены в соответствующих работах [13, 14].

Рассмотрим возможность использования полученных шаблонов корреляционных и спектральных функций для диагностики реальных дефектов механических хронометров. Для этого из партии механических хронометров выбирались отдельные экземпляры, которые подвергались диагностическим испытаниям. С этой целью механический хронометр устанавливался в специальное устройство [15, 16], на выходе которого с помощью акустического метода формировались электрические импульсы, длительность которых была равна текущим значениям  $T_i$ . Далее из последовательности импульсов  $T_i$  аппаратным способом формировались электрические импульсы, пропорциональные разности  $\Delta_i = T_i - T_n$ , и затем эти импульсы с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразовывались в цифровой код. Из оцифрованной последовательности импульсов  $\Delta_i$  формировалась выборка, содержащая  $n = 30$  значений  $\Delta_i$ . Полученная выборка проверялась на статистическую однородность, поскольку в процессе измерения  $\Delta_i$  из-за внешних и внутренних помех [13–15] могут возникать грубые ошибки. Наличие грубых ошибок в выборке, т. е. значений  $\Delta_i$ , сильно отличающихся от среднего значения  $\Delta_i$ , приводит к искажению статистических характеристик выборки в целом. Они должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Статистическая однородность выборки проверялась на основе критерия Шовене [16]. В результате проделанного эксперимента были получены значения  $\Delta_i$  ( $n = 30$ ), представленные в таблице.

**Зависимость  $\Delta_i$  от числа отсчетов  $i$**

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta_i$ , мкс	6,1	-0,1	11,5	12,2	19,1	4,4	4,7	1,2	11,2	12,5
$i$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\Delta_i$ , мкс	15,5	8,4	-0,2	-0,1	5,0	9,1	-0,3	-11,9	1,2	-18,3
$i$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\Delta_i$ , мкс	-2,2	-19,2	-18,9	-4,9	-2,2	-18,9	1,1	5,1	-7,9	-1,8

График зависимости  $\Delta_i$  от числа отсчетов  $i$  представлен на рис. 5. По результатам эксперимента были вычислены следующие статистические характеристики:  $\Delta_{cp} = 0,71$  мкс, дисперсия  $D = 96,17$  мкс<sup>2</sup>, а также построены графики норми-

рованной корреляционной и спектральной функций, которые представлены соответственно на рис. 6 и 7.

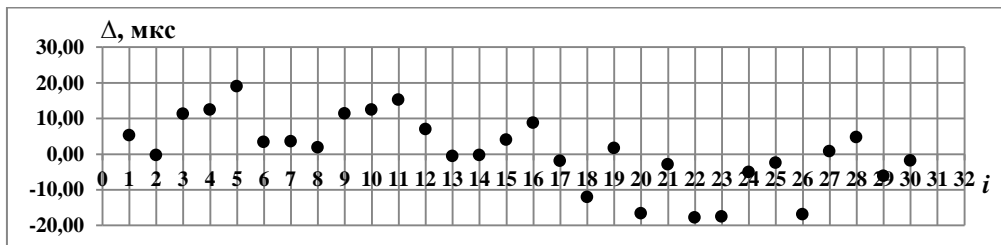


Рис. 5. График функции  $\Delta_i$

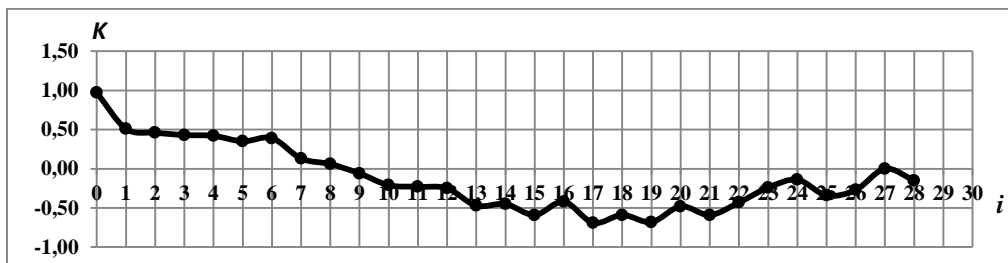


Рис. 6. График функции  $K_i$

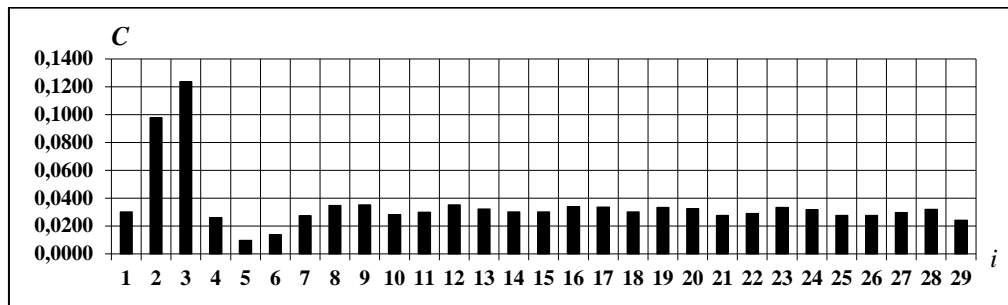


Рис. 7. График функции  $C_i$

Полученное в результате обработки экспериментальных данных среднее значение  $\Delta_{cp} = 0,71$  мкс показывает, что механический хронометр будет отставать от эталонного на интервале, равном 0–30 отсчетов на величину 0,71 мкс. Величина дисперсии  $D = 96,17$  мкс<sup>2</sup> будет характеризовать значительный разброс  $\Delta_i$  относительно среднего значения  $\Delta_{cp}$ , что свидетельствует о наличии определенных скрытых дефектов механического хронометра. Для более детальной оценки состояния механизма хронометра с целью выявления дефектов проведем анализ полученных корреляционной и спектральной функций.

Полученный график корреляционной функции  $K_i$  показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии в ее составе некоторых ярко выраженных гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности  $C_i$  показывает их смещение в область нижних частот и относительную их равномерность в области верхних частот, что может

свидетельствовать о дефектах палеты спускового механизма и незначительном биении анкерного колеса механического хронометра.

На основе предложенного метода идентификации скрытых (неявных) дефектов механических хронометров, приводящих к их метрологическим отказам, авторами была разработана методика обнаружения и идентификации дефектов, представленная ниже.

1. На основе предполагаемой теоретической модели поведения функции  $\Delta_i$  от отсчетов времени  $i$  экспериментальным путем устанавливается связь между моделью и определенным дефектом механического хронометра, которая затем проверяется на адекватность.

2. Вычисляются и строятся с помощью средств информационных технологий графики корреляционной и спектральной функций, которые принимаются в качестве шаблонов (масок) для идентификации дефектов.

3. Формируется библиотека шаблонов из полученных графиков корреляционных и спектральных функций, которые соответствуют определенным дефектам часового механизма.

4. На основе сформированной библиотеки шаблонов осуществляется сравнение шаблонов с полученными характеристиками диагностируемого механизма: корреляционной и спектральной функций. Результатом сравнения является идентификация дефектов, приводящих к метрологическим отказам механического хронометра.

### **Выводы**

1. Предложен метод диагностики, позволяющий идентифицировать скрытые дефекты механических хронометров, приводящих к их метрологическим отказам.

2. На основе предложенного метода разработана и апробирована методика выявления скрытых дефектов механических хронометров.

3. Использование разработанной методики диагностики обеспечивает достаточно высокий уровень выявления дефектов механического хронометра. В частности, при диагностировании партии из 100 механических хронометров, имеющих скрытые дефекты, в 98 случаях дефекты классифицировались правильно.

4. Полученные в статье результаты диагностики могут быть распространены и на другие виды ТСХ [21].

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
2. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
4. Прикладной анализ случайных процессов: Под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
5. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. – 277 с.
6. Аврамчук В.С., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–115.
7. Аврамчук В.С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 113–117.
8. Прохоров С.А., Графкин В.В. Структурно-спектральный анализ случайных процессов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 128 с.

9. *Вашкевич Н.П., Домнин Л.Н., Сорокин В.Н., Чернягин Б.М.* Машинный анализ диаграмм хода часов // Часы и часовые механизмы: Сб. трудов НИИЧаспрома. – Вып. 8. – М., 1971. – 144 с.
10. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.
11. *Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г.* Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции, ИПУСС РАН. – Самара, 2013. – С. 615–618.
12. *Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г.* Синтез цифровых КИХ-фильтров для решения задач восстановления сигналов с использованием критерия моментов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – Вып. 36. – С. 98–105.
13. *Яшин В.Н.* Методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – Вып. 43. – С. 63–72.
14. *Яшин В.Н.* Информационно-измерительные подходы для оценки технических средств хронометрии: монография. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 120 с.
15. *Миронов В.П., Яшин В.Н.* А.с. 1205126 СССР, МКИЗ G 04 D 7/12 Устройство для формирования временных интервалов хода балансовых часов. СССР. № 3762203/24-10; заявл. 02.07.84; опубл. 15.01.86, Бюл. № 2.
16. *Яшин В.Н.* Повышение помехозащищенности канала измерения метрологических характеристик технических средств хронометрии // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 125–128.
17. *Якимов В.Н.* Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 7. – С. 1346–1353.
18. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 209–217.
19. *Kolodenkova A.E., Dolgii A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 277–283.
20. *Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В.* Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 84–86.
21. *Шполянский В.А.* Хронометрические системы. – М.: Машиностроение. 1980. – 584 с.

*Статья поступила в редакцию 23 января 2018 г.*

# DIAGNOSIS OF TECHNICAL MEANS OF CHRONOMETRY BASED ON THE ANALYSIS OF CORRELATION AND SPECTRAL FUNCTIONS BY MEANS OF INFORMATION TECHNOLOGY

*V.N. Yashin, A.E. Kolodenkova*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper deals with the problems of using of correlation and spectral functions apparatus for technical means of chronometry diagnosing as well as using of information technologies for automatization of finding, constructing and analyzing processes of correlation and spectral functions. The paper presents the main approaches to diagnosis of technical means of chronometry, the mechanical chronometer in particular, based on using the correlation and spectral functions apparatus, as well as using information technology to automate the processes of finding statistical characteristics. On the basis of existing methods and means of diagnostics analyzing the diagnostics method of technical means of chronometry is offered. It is based on working out the information models attached to certain defects of the mechanical chronometer.*

**Keywords:** *diagnostics, technical means of chronometry, measurement error, time intervals, correlation function, spectral function.*

## REFERENCES

1. *Bendat George, Piersol A.* Measurement and analysis of random processes. – M.: Mir, 1974. – 464 p.
2. *Mirsky G.Ya.* Characteristics of stochastic interrelation and their measurements. – M.: Energo-published, 1982. – 320 p.
3. *Tikhonov V.I.* Statistical radio engineering. – Moscow: Radio and communication, 1982. – 624 p.
4. Applied analysis of random processes. Edited by Prokhorova S.A. / scientific centre of RAS, 2007. – 582 p.
5. *Prokhorov S.A.* Modeling and analysis of random processes. Laboratory practice. SCIENTIFIC CENTRE OF RAS, 2002. – 277 p.
6. *Avramchuk V.S., Chan Viet Tiau.* Frequency-time correlation analysis of digital signals // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. – 2009. – Vol. 315. – № 5. – P. 112–115.
7. *Avramchuk V.S.* Determination of the presence of the harmonic components and their frequencies in a discrete signal on the basis of the autocorrelation function // News of Tomsk Politechnical universities. – 2012. – Vol. 321. – № 5. – P. 113–117.
8. *Prokhorov S.A., Grafkin V.V.* Structural-spectral analysis of random processes / SNC RAS, 2010. – 128 p.
9. *Vashkevich N.P., Domnin L.N., Sorokin V.N., Chernyagin B.M.* Machine analysis of diagrams of the clock // Sat. works of Niichasprom «Clock and clockwork». – M.-Issue. 8. – 1971. – 144 pp.
10. *Diakonov V.P.* Reference book on algorithms and programs in basic language for personal computers. Handbook. – M.: Science. GL. ed. Fiz. – Mat. lit., 1987. – 240 p.
11. *Batishchev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Synthesis of control to restore the blurred image using the regularization methods // problems of control and modeling in complex systems: proceedings of the XV International conference, IPUSS RAN. – Samara, 2013. – P. 615–618.
12. *Batishchev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Synthesis of digital FIR filters for solving problems of signal recovery using the criterion of moments // Bulletin of Samara state technical University. Ser. Technical science. – 2012. – Issue 36. – P. 98–105.
13. *Yashin V.N.* Methodological approaches for measuring and control of major metrological characteristics of technical means of timekeeping // Vestnik of Samara state technical University. Ser. Technical science. – 2014. – Issue 43. – Pp. 63–72.

---

*Vladimir N. Yashin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*  
*Anna E. Kolodenkova (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

14. *Yashin V.N.* Information-measuring approaches for chronometer technical means estimation. – Moscow: INFRA-M, 2017. 120 p.
15. *Mironov V.P., Yashin V.N.* A.S. 1205126 of the USSR, MKIZ G 04 D 7/12 A device for balance chronometer time intervals forming. USSR. No. 3762203/24-10; ref. 02.07.84; publ. 15.01.86, bul. No. 2.
16. *Yashin V.N.* Increase of noise immunity channel of measurement of metrological characteristics of technical means of chronometry: Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings-2016". – Penza: publishing house of PSU, 2016. – P. 125–128.
17. *Yakimov V.N.* Digital integrated statistical analysis based on the symbolic representation of random processes // Proceedings of the Samara scientific center of RAS. – 2016. – Vol. 18. – No. 7. – Pp. 1346–1353.
18. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 209–217.
19. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 277–283.
20. *Yakimov V.N., Batishchev V.I., Mashkov A.V.* A modular approach to the development of information-measuring system for digital estimation of power spectral density: collection of scientific works. V. International. science.-tech. Conf. "Shlyandinskie reading-2016". – Penza: publishing house of PSU, 2016. – Pp. 84–86.
21. *Shpolyansky V.A.* Chronometric systems. – M.: Mechanical Engineering. 1980. – 584 p.