

## МЕТОД И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСХОЖДЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

А. А. СКОБЕЛИН, С. В. БАУШЕВ

*Российский институт радионавигации и времени, 192012, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Skobelin@rirt.ru*

Представлен методический аппарат, который может быть использован для выявления зависимости погрешности прогнозирования расхождения шкал времени распределенных в пространстве часов от факторов, влияющих на процессы измерения расхождения шкал времени и формирования этих шкал. Предлагаемый подход учитывает влияние на погрешность прогнозирования расхождения: погрешности сравнения шкал времени удаленных часов и нестационарных свойств процесса формирования шкал времени за счет характеристик задающего генератора. Подход позволяет обобщить результат расчета погрешности прогнозирования применительно к широкому классу задающих генераторов. Предложена математическая модель формирования отсчетов исследуемого генератора, с помощью вычислительного эксперимента и сравнения с результатами измерения реального генератора показана ее адекватность. Описаны метод и алгоритм определения погрешности прогнозирования расхождения шкал времени, приведены результаты решения контрольной задачи расчета погрешности прогнозирования.

**Ключевые слова:** *взаимная синхронизация, погрешность прогнозирования, расхождение шкал времени*

**Введение.** В настоящее время многие информационно-управляющие системы представляют собой территориально распределенные аппаратно-программные комплексы, которые могут быть разнесены на тысячи километров. Это характерно, например, для региональных и глобальных навигационных систем, систем мониторинга состояния космического пространства (распределенных в пространстве радиолокационных комплексов), систем управления воздушным движением и др.

Для того чтобы обеспечить синхронность действий элементов, в пространственно распределенной системе выполняются процедуры синхронизации часов, принадлежащих различным элементам системы. Под синхронизацией понимается процесс, направленный на обеспечение совпадения показаний часов в одноименные моменты времени, компенсацию их взаимных расхождений, а также результат этого процесса.

Синхронизация разнесенных в пространстве часов является одной из важнейших задач для научно-технических приложений, где информация о времени играет критическую роль (космических систем, высокоскоростных объектов, навигационных систем), а также для тактовой синхронизации высокоскоростных сетей цифровой связи и др.

Современные цифровые часы включают задающий генератор (ЗГ) и технические средства, обеспечивающие формирование на основе сигнала ЗГ упорядоченной последовательности

событий и соответствующих им значений времени\* — шкалы времени (ШВ). Для высокостабильных часов в качестве ЗГ применяются стандарты частоты, при этом нестабильность ШВ в основном определяется характеристиками ЗГ.

Системы синхронизации разнесенных в пространстве часов по способу учета и компенсации их взаимных расхождений могут быть разделены на два класса:

1) с подстройкой ведомых часов, часто называемые системами реального времени, в них осуществляется подстройка ведомых часов под системную шкалу времени или ведущие часы в масштабе времени, близком к реальному — синхронизация заключается в сравнении шкал времени ведомых и ведущих часов (измерении смещений между одноименными моментами времени) и своевременной компенсации смещений с помощью управляющих воздействий на задающие генераторы ведомых часов [1]. Поскольку в ряде случаев это технически невозможно или нецелесообразно, а также снижается надежность функционирования системы синхронизации, особенно в системах с транспортным запаздыванием (например, спутниковых радионавигационных), то одним из основных направлений повышения точности взаимной синхронизации ШВ является повышение стабильности ЗГ и прогнозирование расхождения ШВ и его учет;

2) с учетом расхождения шкал времени (РШВ). Потребителю сообщается, какие поправки необходимо добавить к показаниям часов — уход ШВ ведомых часов относительно ведущих представляется детерминированной в дифференциальных уравнениях или статистической математической моделью, описывающей зависимость РШВ от времени [2]. Значения поправок представляют собой результат прогноза расхождения ШВ на интервале экстраполяции.

Отклонение прогнозного значения расхождения шкал времени синхронизируемых часов от фактического („действительного“) определяется, в частности, погрешностью (ошибкой) прогнозирования — количественной мерой, описывающей точность процесса прогнозирования в системах синхронизации.

На погрешность прогнозирования влияют в основном непрогнозируемый уход ШВ ведомых часов за счет нестабильности частоты ЗГ, а также ошибка сравнения шкал времени часов, вызванная погрешностью используемых средств и методов сравнения.

Целью статьи является разработка научно-методического аппарата выявления взаимосвязи погрешности прогнозирования ШВ ведомых часов с нестабильностью их ЗГ и погрешностью сравнения ШВ ведомых и ведущих часов.

Прогнозированию шкал времени в системах с распределенными в пространстве часами и анализу нестабильности частоты задающих генераторов посвящен широкий круг работ [3—5]. В отличие от этих работ, в предлагаемом методе учитываются погрешность сравнения шкал времени, вклад которой в погрешность прогнозирования в настоящее время сравним с вкладом нестабильности частоты, а также нестационарность процесса формирования шкал времени вследствие характеристик задающего генератора. Такой подход позволяет обобщить численное решение задачи оценки погрешности прогнозирования применительно к широкому классу генераторов и характеристик средств сравнения ШВ.

**Методические основы прогнозирования расхождения шкал времени.** В работе [6] предложена классификация статистических методов прогнозирования, с позиции которой предлагаемый подход представляет собой развитие метода экстраполяции на основе „подгонки“ полиномом.

---

\* ГОСТ 8.567-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения

В основе подхода к определению взаимосвязи погрешности прогнозирования РШВ ведомых часов (рис. 1) с нестабильностью частоты и ошибкой сравнения ШВ лежат следующие положения:

- 1) уход ШВ ведомых часов относительно ШВ ведущих может быть описан некоторой функцией времени, например, линейной или квадратичной в зависимости от типа стандарта частоты, с наложенными на нее шумами, т.е. уход ШВ может быть представлен как линейная комбинация детерминированной и случайной составляющих;
- 2) для численной оценки нестабильности частоты задающего генератора ведомых часов используется вариация Аллана;
- 3) нестабильность частоты задающего генератора ведущих часов много меньше нестабильности частоты ведомых часов и не учитывается при анализе;
- 4) динамика характеристик наблюдаемого стандарта частоты заменяется его математической моделью, описывающей зависимость ухода ШВ от времени наблюдения, т.е.  $f(t)$ , где  $t=t(t)$ ;
- 5) в качестве параметров модели используются оценки соответствующих характеристик стандарта частоты ведомых часов, получаемых при обработке наблюдаемых реализаций случайного процесса — экстраполируется уход ШВ объекта на задаваемый интервал прогнозирования по результатам анализа реализации этого же случайного процесса на интервале наблюдения реального стандарта частоты;
- 6) в качестве прогнозного значения РШВ используется полученное значение по построенной модели, которое применяется как поправка к ведомым часам.

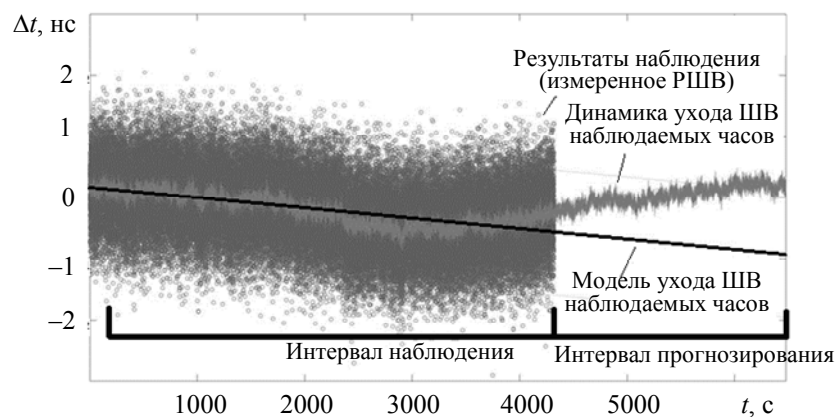


Рис. 1

На интервале наблюдения по исходным результатам сравнения ШВ определяются параметры модели ухода шкалы времени (на рис. 1 модель — полином первой степени). Результаты измерения включают в себя непрогнозируемый уход ШВ, вызванный нестабильностью частоты (поведение наблюдаемых часов), и случайную ошибку сравнений ШВ. В общем случае динамика характеристик стандарта частоты представляет собой нестационарный и неэргодический случайный процесс, что видно на рис. 1: математическое ожидание и дисперсия зависят от момента и интервала наблюдения, одна реализация отличается от другой.

В настоящее время для прогнозирования уходов ШВ применяются [6]:

- экстраполяция процесса РШВ степенным полиномом, основанная на методе наименьших квадратов (МНК) [7];
- экстраполяция процесса степенным полиномом с экспоненциальным сглаживанием результатов измерений;
- прогнозирование на основе моделей авторегрессии и интегрированного скользящего среднего;
- прогнозирование на основе фильтра Калмана [8].

В статье выполняются экстраполяция с использованием МНК и аппроксимация ухода ШВ полиномом первой степени, однако могут быть использованы любой из известных методов прогнозирования и модель любой сложности.

Значения прогнозного РШВ получаются с использованием модели. Расхождение прогнозных и фактических показаний наблюдаемых ведомых часов („действительного“ значения) представляет собой ошибку прогнозирования.

В качестве значения ошибки прогнозирования шкал времени используется среднее квадратическое отклонение (СКО) прогнозного значения РШВ от „действительного“, приведенное к  $N$  интервалам прогнозирования:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{0i})^2}, \quad (1)$$

где  $x_i$  и  $x_{0i}$  — прогнозные и „действительные“ значения РШВ в середине  $i$ -го интервала прогнозирования;  $N$  — число интервалов прогнозирования.

Необходимое для обеспечения репрезентативности выборки значение  $N$  определяется итерационно путем проверки выборки на соответствие нормальному закону с использованием критерия Пирсона.

Результаты измерений будем представлять случайной величиной  $X$  с нормальным распределением и нулевым средним, а процесс, описывающий уход ШВ ведомых часов, представим случайной величиной  $Y$ , являющейся в общем случае реализацией нестационарного и неэргодического случайного процесса с определенной по результатам испытаний реальных стандартов частоты спектральной плотностью мощности флуктуаций.

Так как измерение РШВ и случайное изменение частоты генератора объекта представляют собой не взаимосвязанные процессы, их будем полагать некоррелированными. Таким образом [9], совокупная дисперсия двух указанных случайных величин определяется выражением:

$$D[X + Y] = D[X] + D[Y], \quad (2)$$

где  $D[X]$ ,  $D[Y]$  — дисперсия случайных величин  $X$  и  $Y$ .

Тогда модель измерений РШВ может быть выражена суммой случайной величины, отражающей случайный характер определения РШВ, и случайной величины, представляющей собой временной ряд показаний ведомых часов.

**Методика оценивания погрешности прогнозирования расхождения ШВ.** Для решения задачи оценивания ошибки прогнозирования РШВ предлагается следующая методика.

1. Составляется математическая модель функционирования задающего генератора ведомых часов.

Уход шкалы времени ведомых часов может быть представлен выражением [10]:

$$\Delta T(t) = T_0 + \frac{\Delta f}{f_0} t + \frac{1}{2} dt^2 + \sigma_x(t), \quad (3)$$

где  $T_0$  — РШВ в начальный момент времени;  $t$  — время;  $f_0$  — номинальное значение меры частоты;  $\frac{\Delta f}{f_0}$  — относительное отклонение измеренного значения меры частоты;  $d$  — значение дрейфа частоты;  $\sigma_x(t)$  — непрогнозируемый уход ШВ, вызванный нестабильностью частоты генератора.

Как известно [10, 11], нестабильность большинства высокостабильных источников частоты можно описать независимыми шумовыми процессами со спектральной плотностью мощности (СПМ), зависящей от частоты:

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha}, \quad (4)$$

где  $h_{\alpha}$  — коэффициенты при степенных функциях;  $f^{\alpha}$  — степенная функция модели шума.

Учитывая, что частота — производная от фазы, можно записать:

$$S_y(f) = \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 S_{\varphi}(f), \quad (5)$$

где  $S_{\varphi}(f)$  — СПМ флуктуаций фазы.

Выделяют [10] пять типов доминирующих шумовых процессов:

- белый шум фазы ( $S_{\varphi}(f) = f_0^2 h_2 f^0$ );
- фликкер-шум фазы ( $S_{\varphi}(f) = f_0^2 h_1 f^{-1}$ );
- белый шум частоты ( $S_{\varphi}(f) = f_0^2 h_0 f^{-2}$ );
- фликкер-шум частоты ( $S_{\varphi}(f) = f_0^2 h_{-1} f^{-3}$ );
- шум случайных блужданий ( $S_{\varphi}(f) = f_0^2 h_{-2} f^{-4}$ ).

Флуктуации фазы в частотной области эквивалентны фазовой модуляции во временной области [10].

Пусть временной ряд  $\{x_{0i}\}_n$  представляет собой множество отсчетов фазы  $3\Gamma$  относительно системной ШВ (ШВ ведущих часов) размером  $n$  в дискретные моменты времени  $t_i$ .

Тогда с учетом (3)—(5) элементы дискретного моделируемого временного ряда могут быть рассчитаны как:

$$x_{0i} = T_0 + \frac{\Delta f}{f_0} i + \frac{1}{2} d i^2 + \frac{1}{2\pi f_0} [h_0 x_i^{WP} + h_1 x_i^{FP} + h_2 x_i^{WF} + h_3 x_i^{FF} + h_4 x_i^{RW}], \quad (6)$$

где  $i$  — номер отсчета (момента времени);  $x_i^{WP}$  — моделированный  $i$ -й отсчет фазы со СПМ фазовых флуктуаций, соответствующей белому шуму фазы;  $x_i^{FP}$  — моделированный  $i$ -й отсчет фазы со СПМ фазовых флуктуаций, соответствующей фликкер-шуму фазы;  $x_i^{WF}$  — моделированный  $i$ -й отсчет фазы со СПМ фазовых флуктуаций, соответствующей белому шуму частоты;  $x_i^{FF}$  — моделированный  $i$ -й отсчет фазы со СПМ фазовых флуктуаций, соответствующей фликкер-шуму частоты;  $x_i^{RW}$  — моделированный  $i$ -й отсчет фазы со СПМ фазовых флуктуаций, соответствующей шуму случайных блужданий частоты;  $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$  — коэффициенты при степенных функциях.

Моделирование отсчетов с заданной СПМ фазовых флуктуаций от частоты производится численными методами [10, 12].

Регулируя коэффициенты модели, возможно сформировать временной ряд с заданной зависимостью нестабильности от времени измерения, оцениваемой с использованием вариации Аллана. Указанные коэффициенты при моделировании различных реальных генераторов

(стандартов частоты) различаются, и их значения следует обосновывать на предваряющем моделирование этапе изучения характеристик объекта моделирования.

Для обеспечения достоверности результатов производится верификация моделируемого временного ряда путем расчета вариации Аллана по значениям ряда и ее сопоставления с заданными значениями (полученными при испытаниях исследуемых генераторов), при этом если отклонение превышает пороговое значение, то моделирование ряда повторяется. Каждому смоделированному временному ряду сопоставляется значение вариации Аллана, рассчитанное на интервале прогнозирования.

2. Формирование дискретного временного ряда измерений  $\{x'_{0i}\}_n$  путем модификации временного ряда  $\{x_{0i}\}_n$  согласно выражению:

$$x'_{0i} = x_{0i} + x_{wni}, \quad (7)$$

где  $x_{wni}$  — отклонения измерений, имеющие нормальное распределение с нулевым средним и заданной дисперсией.

3. Прогнозирование расхождения шкал времени. Для расчета прогнозных значений на интервале наблюдения по значениям временного ряда  $\{x'_{0i}\}_n$  при помощи МНК с использованием полинома первой степени рассчитываются коэффициенты модели и ряд прогнозных значений  $\{x_i\}_n$  в середине выбранных интервалов прогнозирования  $t_{pri}$ :

$$x_i = c_1 t_{pri} + c_0, \quad (8)$$

где  $c_1, c_0$  — коэффициенты модели.

4. Расчет единичных ошибок прогнозирования в виде разности между элементами рядов  $\{x_{0i}\}_n$  и  $\{x_i\}_n$  в середине интервалов прогнозирования, определение числа интервалов и расчет ошибки прогнозирования по формуле (1).

Далее расчет повторяется с первого шага, при этом в качестве параметров, по которым осуществляется перебор, используются коэффициенты  $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$  и СКО результатов сравнения ШВ. В результате формируется массив значений ошибок прогнозирования, которым сопоставлены значения вариации Аллана и СКО результатов сравнений ШВ.

**Алгоритм расчета погрешности прогнозирования.** Согласно представленной методике синтезирован алгоритм, на основании которого разработана программа, позволяющая получить численное значение ошибки прогнозирования в зависимости от нестабильности частоты генератора и ошибки определения РШВ.

Входными данными для алгоритма расчета являются:

- длительность интервала наблюдения ( $T_n$ );
- длительность интервала прогнозирования ( $T_{пр}$ );
- нестабильность частоты генератора (коэффициенты модели  $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$  и контрольные значения вариации Аллана  $\sigma_y(\tau)$ );
- СКО результатов сравнений ШВ ( $\sigma_n$ ) и их приращения;
- размер выборки (исходного временного ряда)  $n$ .

Формализованная запись алгоритма представлена на рис. 2 (индекс  $k$  — номер интервала прогнозирования,  $s$  — номер временного ряда с заданной нестабильностью частоты задающего генератора,  $M$  — число временных рядов с различной нестабильностью частоты задающего генератора).

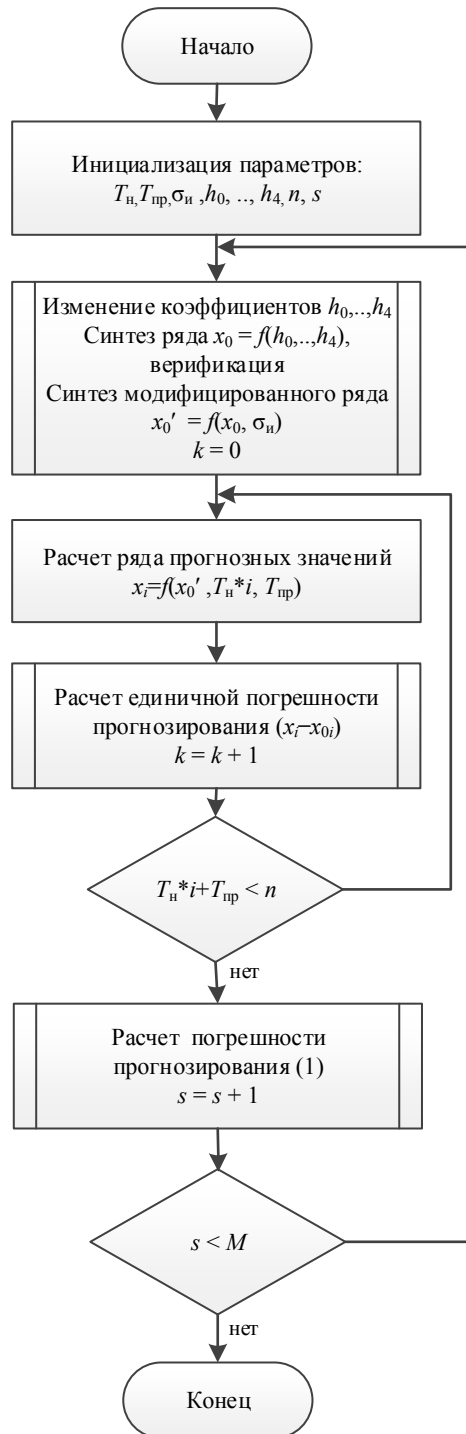


Рис. 2

**Решение контрольной задачи с применением предлагаемого алгоритма.** С использованием разработанной на основе алгоритма программы в среде Matlab определена зависимость ошибки прогнозирования от нестабильности частоты задающего генератора и ошибки сравнения ШВ.

На рис. 3 и 4, а в качестве иллюстрации работы программы на этапе синтеза исходных временных рядов представлены результаты моделирования отсчетов временного ряда  $\{x_{0i}\}_n$  и оценка вариации Аллана для указанного временного ряда. На рис. 3 отображена зависимость фазы ЗГ ведомых часов от времени на 10-суточном интервале.

На рис. 4, а приведен график вариации Аллана, рассчитываемой для верификации значений нестабильности частоты, для времени измерений от 100 до 86 400 с (сутки).

На рис. 4, б в целях сравнения моделированных и реальных данных представлен график вариации Аллана реального стандарта частоты — активного водородного атомного стандарта частоты [13].

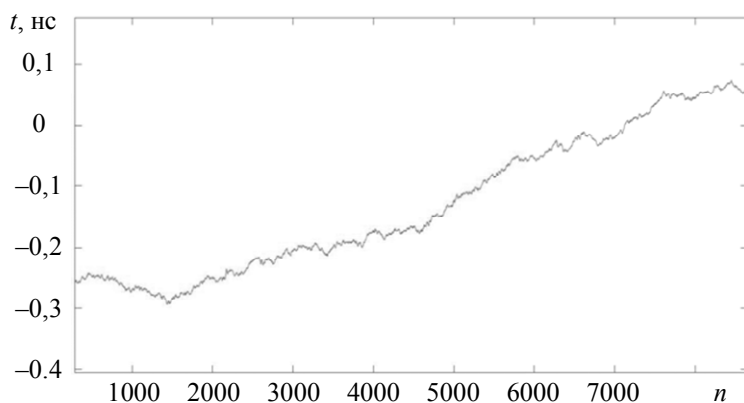


Рис. 3

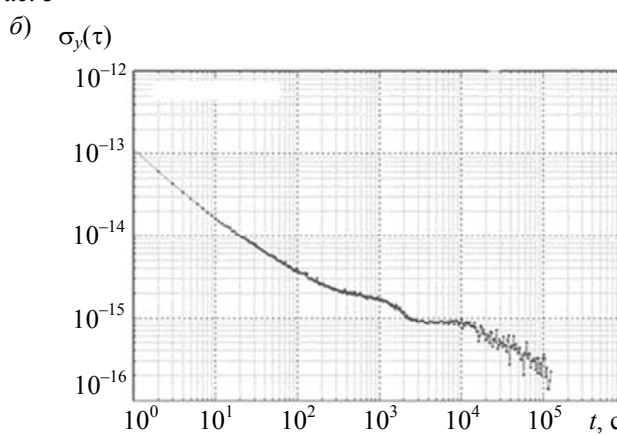
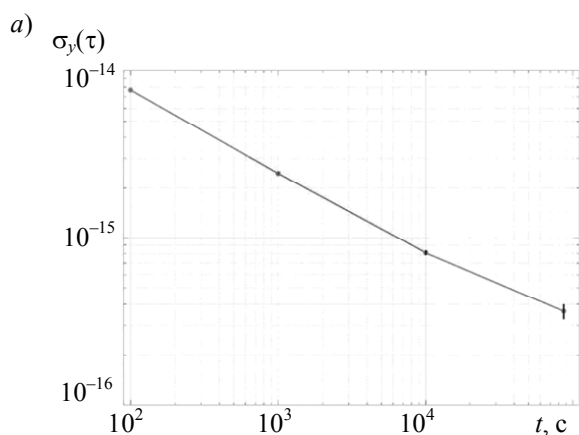


Рис. 4

На рис. 5 представлен трехмерный график зависимости ошибки прогнозирования ( $\sigma_{\text{пр}}$ ) от нестабильности генератора и погрешности измерения РШВ ( $\sigma_{\text{изм}}$ ). График построен для фиксированных значений длительности интервала наблюдения (1 ч) и прогнозирования (30 мин). Погрешность определения РШВ задана в виде СКО результатов измерения, нестабильность генератора — в виде целочисленного вектора номеров, где каждому номеру соответствует значение вариации Аллана  $((0,04—1) \cdot 10^{-11})$ , рассчитанное на интервале прогнозирования.

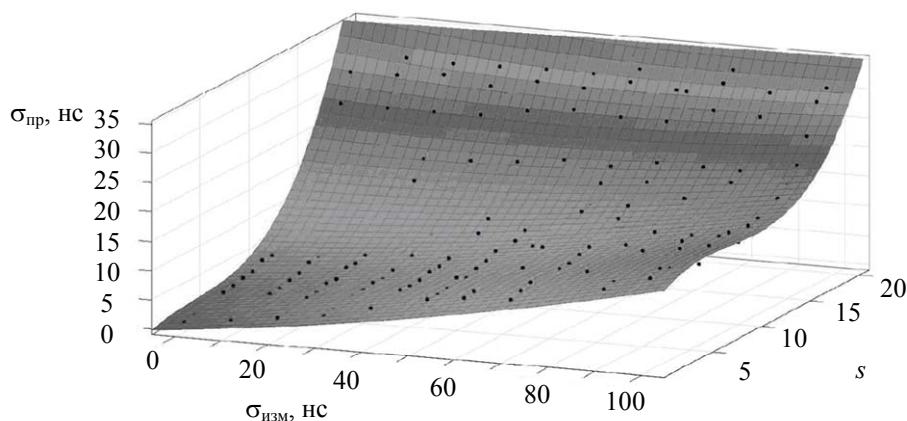


Рис. 5

Анализ результатов моделирования временных рядов  $\{x_{0i}\}_n$  на основе сравнения расчетных значений вариации Аллана по измерениям реальных генераторов и моделированным



данным показал возможность определения коэффициентов модели  $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$  для синтеза рядов, описывающих ЗГ с необходимой зависимостью нестабильности частоты от времени. Это позволяет сделать вывод об адекватности предлагаемой модели и ее применимости для анализа ошибки прогнозирования.

Результаты расчета ошибки прогнозирования ведомых часов показывают, что для любого значения ошибки определения РШВ при фиксированных параметрах прогноза существует оптимальное значение нестабильности частоты, при котором погрешность минимальна, а дальнейшее снижение нестабильности частоты неэффективно без соответствующего изменения требований к ошибке определения РШВ.

**Выводы.** В статье предложены методический подход к определению взаимосвязи погрешности прогнозирования ШВ ведомых часов в распределенных системах синхронизации с нестабильностью частоты и ошибкой сравнения ШВ, алгоритм реализации предложенного подхода, представлены результаты расчета ошибки прогнозирования на контрольном примере и проведен их анализ. Показана адекватность модели (6) формирования отсчетов исследуемого генератора. Предложенный методический аппарат, отличающийся от известных тем, что при расчете учитываются ошибка сравнения ШВ и нестационарные свойства процесса ухода ШВ, позволяет повысить точность расчета ошибки прогнозирования, является универсальным и может быть использован для анализа систем синхронизации с любыми точностными характеристиками средств сравнения ШВ и характеристиками нестабильности задающих генераторов с целью эффективного выбора сочетания указанных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gauthier J. P., Glennon E. P., Rizos Ch. C., Dempster A. G. Time Transfer Performance of Locata – Initial Results // Proc. of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Institute of Navigation Precise Time and Time Interval (PTTI) Conf. Bellevue, Washington, December, 2013. P. 150—157.
2. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 415 с.
3. Богданов П. П., Дружин В. Е., Нечаева О. Е., Тюляков А. Е., Феоктистов А. Ю., Шупен К. Г. Совершенствование частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС // Исследования наукограда. 2013. № 3–4 (6), июль—декабрь. С. 12—16.
4. Ханыхова Е. А., Тиссен В. М. Исследование нестабильностей атомных часов методами имитационного моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конф. 8—18 апреля 2014. Новосибирск: СГТА, 2014. Т. 2. С. 110—114.
5. Yifei Lv, Zhiqiang Dai, Qile Zhao, Sheng Yang, Jimming Zhou and Jingnan Liu. Improved Short-Term Clock Prediction Method for Real-Time Positioning // Sensors (Basel) — Open Access Journal. 2017. Vol. 17, N 6 [Электронный ресурс]: <www.mdpi.com/journal/sensors>.
6. Алешкин А. П., Мысливцев Т. О., Макаров А. А. Анализ методов прогнозирования ухода шкалы времени радиолокационной станции // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника (РЛТ). 2015. Вып. 1. С. 46—54.
7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М., 1963.
8. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана—Бьюси. М.: Наука, 1982.
9. Жакод Ж., Ширяев А. Н. Предельные теоремы для случайных процессов. М.: Физматлит, 1994. 370 с.
10. Riley W. J. Handbook of Frequency Stability Analysis. Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 1065. 2008. July. 136 p.
11. Riehle F. Frequency Standards. Basics and Applications. Darmstadt: WILEY-VCH, 2009. ISBN 3-527-40230-6.
12. Борисов Б. Д. Модели спектральной плотности мощности фликкер-шумов // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2(12). С. 78—82.

13. Воронцов В. Г., Беляев А. А., Демидов П. А., Поляков В. А., Сахаров Б. А., Гладильщиков М. Л. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // „Метрология времени и пространства“. Матер. VIII Междунар. симп. СПб, 14—16 сентября 2016. С. 55—56. ISBN: 978-5-903232-63-5.

#### Сведения об авторах

- Александр Александрович Скобелин** — Российский институт радионавигации и времени, отдел системного проектирования средств синхронизации; начальник отдела; E-mail: Skobelin@irt.ru
- Сергей Валентинович Баушев** — д-р воен. наук, профессор; Российский институт радионавигации и времени, блок генерального конструктора; зам. генерального конструктора; E-mail: Baushev\_sv@irt.ru

Поступила в редакцию  
30.10.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Скобелин А. А., Баушев С. В. Метод и алгоритм определения погрешности прогнозирования расхождения шкал времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 301—311.

### METHOD AND ALGORITHM OF CALCULATING THE ERROR OF PREDICTION OF TIME SCALES DISCORDANCE

A. A. Skobelin, S. V. Baushev

Russian Institute of Radionavigation and Time, 192012, St. Petersburg, Russia  
E-mail: Skobelin@irt.ru

A technique is presented that can be used to identify the error of prediction of divergence of time scales discordance for space-distributed clocks. The proposed approach accounts for the error of comparing the time scales of remote clocks as well as nonstationary properties of the time scale generation process dependent on the master clock generator parameters. The approach makes it possible to generalize the numerical solution obtained for the problem of prediction the time scales divergence error to a wide range of master clock generators. A mathematical model of the clock generation process for the generator under consideration is proposed. The model adequacy is demonstrated using simulation experiment and comparison with the results of measurements performed with the real generator. A method and algorithm of calculating the error of time scales divergence prediction are described, results of a test problem solution with the method are presented.

**Keywords:** mutual synchronization, prediction error, time scales divergence

#### REFERENCES

- Gauthier J.P., Glennon E.P., Rizos Ch.C., Dempster A.G. *Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, Bellevue, Washington, December, 2013, pp. 150–157.
- Shebshayevich V.S., Dmitriyev P.P., Ivantsevich N.V. et al. *Setevyye sputnikovyye radionavigatsionnyye sistemy* (Network Satellite Radio Navigation Systems), Moscow, 1993, 415 p. (in Russ.)
- Bogdanov P.P., Druzhin V.E., Nechayeva O.E., Tyulyakov A.E., Feoktistov A.Yu., Shupen K.G. *The Research of the Science City*, 2013, no. 3–4(6), July–December, pp. 12–16. (in Russ.)
- Khanykova E.A., Tissen V.M. *X mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya GEO-Sibir' 2014* (X International Scientific Conference "GEO-Siberia 2014"), *SibOptika-2014* (Siberian Optics-2014), Proceedings of the Scientific Conference, Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, April 8–18 2014, vol. 2, pp. 110–114. (in Russ.)
- Yifei Lv, Zhiqianq Dai, Qile Zhao, Sheng Yang, Jimming Zhou and Jingnan Liu. *Sensors (Basel), Open Access Journal*, 2017, vol. 17(6), www.mdpi.com/journal/sensors.
- Aleshkin A.P., Myslivtsev T.O., Makarov A.A. *Issues of radio electronics. Radar engineering*, 2015, no. 1, pp. 46–54. (in Russ.)
- Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* (The Method of Least Squares and the Basics of The Mathematical-Statistical Theory of Processing Observations), Moscow, 1963. (in Russ.)
- Brammer K. und Siffing G. *Kalman-Bucy-Filter*, Oldenbourg R., Miinchen, Wien, 1975.
- Jacod J., Shiryaev A.N. *Limit theorems for stochastic processes*, Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences], 288, Springer-Verlag, Berlin, 1987, 601 p.

10. Riley W.J. *National Institute of Standards and Technology Special Publication 1065*, Handbook of Frequency Stability Analysis, July 2008, 136 p. (in Russ.)
11. Riehle F. *Frequency Standards. Basics and Applications*, Darmstadt, WILEY-VCH, 2009. ISBN 3-527-40230-6.
12. Borisov B.D. *Avtomatika i Programmnyaya Inzhineriya* (Automatics & Software Enginery), 2015, no. 2(12), pp. 78–82. (in Russ.)
13. Vorontsov V.G., Belyayev A.A., Demidov P.A., Polyakov V.A., Sakharov B.A., Gladil'shchikov M.L. *Razrabotka aktivnogo vodorodnogo standarta chastoty i vremeni novogo pokoleniya dlya bazovogo kompleksa vremeni i chastoty. Metrologiya vremeni i prostranstva* (Development of an Active Hydrogen Standard of Frequency and Time of the New Generation for the Basic Complex of Time and Frequency. Metrology of Time and Space), Materials of the VIII International Symposium, St. Petersburg, September 14–16, 2016, pp. 55–56, ISBN: 978-5-903232-63-5. (in Russ.)

**Data on authors**

- |                              |                                                                                                                                                             |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alexander A. Skobelin</b> | — Russian Institute of Radionavigation and Time, Division for System Design of Synchronization Means; Head of the Division;<br>E-mail: Skobelin@irt.ru      |
| <b>Sergey V. Baushev</b>     | — Dr. Sci., Professor; Russian Institute of Radionavigation and Time, Department of General Designer; Deputy General Designer;<br>E-mail: Baushev_sv@irt.ru |

**For citation:** Skobelin A. A., Baushev S. V. Method and algorithm of calculating the error of prediction of time scales discordance. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 301–311 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-301-311