



УДК 621.391

В. Е. Ланкин

Южный федеральный университет (Таганрог)

А. К. Шашкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Прогнозирование нестабильностей шкал синхронизации

Рассмотрены модели уходов шкал синхронизации, построенных с использованием кварцевых стандартов частоты. На основе приведенных моделей долговременных уходов шкал построены алгоритмы оценки параметров этих процессов и их прогнозирования. Приведены решения задач для некоторых частных видов нестабильностей.

Формирователи шкал синхронизации, нестабильности шкал синхронизации, виды нестабильностей, математические модели нестабильностей, прогнозирование нестабильностей шкал синхронизации

Актуальность задачи прогнозирования шкал синхронизации. Синхронизация – процедура приведения нескольких процессов к такому их протеканию, когда соответствующие элементы процессов изменяются с постоянным или с заданным сдвигом во времени.

Носителем информации о синхронизации является шкала синхронизации – непрерывная последовательность интервалов времени определенной длительности, отсчитываемая от начального момента.

Повышение стабильности шкал синхронизации – одна из важных задач радиотехники. Параметры шкал синхронизации определяют предельно достижимые характеристики систем связи. Совершенствование таких систем зависит прежде всего от степени стабильности опорных генераторов формирователей сигналов синхронизации. Требования к точности синхронизации увеличиваются по мере совершенствования систем и сетей связи.

Однако в формирователях шкал синхронизации точность не является основной характеристикой при выборе опорного генератора частоты. Весьма существенными показателями являются размер, масса, характеристики нестабильности генератора при различных внешних условиях, надежность, потребляемая мощность и стоимость. Сравнение параметров генераторов, построенных на основе современных технологий, приведено в таблице [1]. В качестве базового выбран цезиевый стандарт; сравнения с ним других стандартов

Обозначение	Параметр качества	Цезиевый стандарт	Ячейка с парами рубидия	Кварцевый генератор
<i>a</i>	Начальные расходы	1	0.5	0.1
<i>b</i>	Эксплуатационные расходы	1	0.5	0.1
<i>c</i>	Стабильность	1	0.1	0.01
<i>d</i>	Надежность	1	1.0	10.0
<i>e</i>	Опыт производства	1	0.5	10.0
Коэффициент качества $F = cde/(ab)$		1	0.2	100.0

достаточно условны. Однако суммарный коэффициент качества может служить ориентиром при выборе опорного генератора.

На рис. 1 приведены характеристики нестабильности стандартов частоты, включенных в таблицу. Зона 1 соответствует кварцевым генераторам, зона 2 – цезиевым, зона 3 – рубидиевым

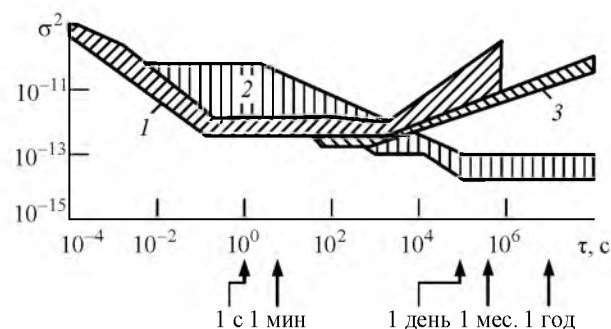


Рис. 1

стандартам частоты. Кварцевые генераторы имеют достаточно хорошие характеристики в интервалах времени от долей секунды до единиц часов [1]–[3]. Такие интервалы времени использования шкал синхронизации соответствуют интервалам формирования и применения шкал синхронизации многих пользователей (телевидение, системы дискретной связи [4], телемеханика, навигация).

В настоящей статье в качестве опорных генераторов формирователей шкал синхронизации рассматриваются кварцевые генераторы как наиболее эффективные и широко применяемые. В пределах интервала времени с относительно постоянными параметрами (от секунд до единиц часов) возможно повышение эффективности систем синхронизации измерением параметров модели процесса нестабильности (ухода шкалы) по отношению к базовой (эталонной) модели и в последующем прогнозировании их. Такой подход к улучшению характеристик хранителя шкалы синхронизации экономически оправдан и относительно прост в реализации. При этом необходимы создание математических моделей процессов нестабильности и оценка параметров таких моделей для конкретных видов нестабильностей.

Описание нестабильностей. На рис. 2 нестабильность $\varphi(t)$ представлена тремя компонентами [5]. Первый компонент $g(t)$ – медленно меняющийся (тренд), который в общих чертах определяет нестационарность процесса. Тренд можно рассматривать как детерминированную составляющую на анализируемой выборке. Как правило, он описывается полиномом, коэффициенты которого являются параметрами прогнозирования.

В качестве второго компонента $y(t)$ рассмотрим флюктуации относительно компонента $g(t)$. Их можно считать локально-стационарным случайным процессом со временем корреляции, превосходящим интервал прогнозирования $T_{пр}$. В этом случае $y(t)$ также является объектом прогнозирования.

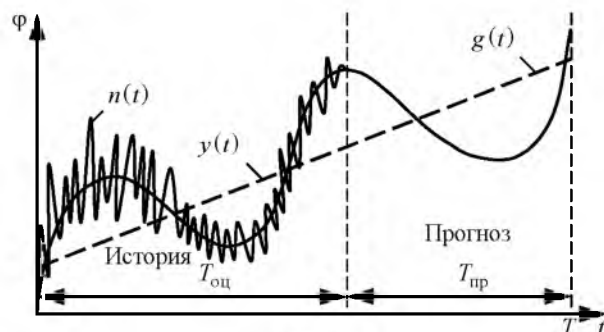


Рис. 2

Третий компонент $n(t)$ – быстрые флюктуации частоты, стационарные по всей выборке, но с длительностью интервала корреляции, значительно меньшей $T_{пр}$. Этот компонент может быть отнесен к инструментальной точности измерения первых двух компонентов.

Таким образом, нестабильность представима в виде

$$\varphi(t) = g(t) + y(t) + n(t) = r(t) + n(t),$$

причем прогнозируются только первые два компонента: $r(t) = g(t) + y(t)$.

Математическая модель нестабильностей.

Метод пространства состояний [6] позволяет достаточно просто находить структуру и параметры фильтра, минимизирующего ошибку фильтрации. В этом методе используется описание нестабильности в виде системы дифференциальных уравнений. Системой таких уравнений можно описать всякий процесс с рациональным спектром, приближающимся к нулю на высоких частотах [6].

Примем процесс нестабильности в виде полинома со случайными коэффициентами:

$$\varphi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \dots + \alpha_{m-1} t^{m-1}, \quad (1)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{m-1}$ – случайные коэффициенты с известной корреляционной матрицей с размерами $m \times m$. Элементами этой матрицы являются значения $E(\alpha_i \alpha_j) = \sigma_{ij}^2$ – дисперсий (при $i = j$) и взаимных дисперсий (при $i \neq j$) коэффициентов.

Преобразуем уравнение (1) в систему дифференциальных уравнений. Для этого введем обозначение: $\varphi(t) = x_1(t)$. Тогда алгебраическое уравнение можно заменить системой m дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t); \\ \dots \\ \dot{x}_m(t) = 0. \end{cases}$$

В векторной форме эта система имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = F \cdot \mathbf{x}(t),$$

где

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

– матрица с размерами $m \times m$;

$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_m(t)]^T$
 ("T" – символ транспонирования).

При $t = 0$ вектор $\mathbf{x}(0)$ определяется через коэффициенты полинома (1) следующим образом:

$$\mathbf{x}(0) = [x_1(0) \ x_2(0) \ \dots \ x_m(0)]^T = [\alpha_0 \ 1 \cdot \alpha_1 \ \dots \ (m-1)! \alpha_{m-1}]^T.$$

Окончательно модель неустойчивости приведем к виду [6]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= F \cdot \mathbf{x}(t) + G \cdot u, \quad t \in [0, T]; \\ r(t) &= \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}(t) + n(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $G = \text{diag}[G_{ii}]$, $i = \overline{1, m}$ – диагональная матрица коэффициентов с размерами $m \times m$;

$$\mathbf{u} = [u_1 \ \dots \ u_m]^T, \quad i = \overline{1, m}$$

– входной ("порождающий") сигнал, в общем случае имеющий корреляционную функцию в виде диагональной матрицы:

$$K_{\mathbf{u}} = [\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}^T] = \begin{cases} \neq 0, & i = j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, m};$$

T – продолжительность наблюдения; $r(t)$ – наблюдаемый процесс; $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ – вектор-строка наблюдений; $n(t)$ – непрогнозируемая составляющая неустойчивости с мощностью N ;

$$E[n(t)n^T(u)] = N\delta(t-u).$$

Интервал наблюдения $[0, T]$ включает интервалы оценки $T_{\text{оц}}$ и прогнозирования $T_{\text{пр}}$ вектора состояния (см. рис. 2). Первое уравнение модели (2) называют уравнением состояния, второе (скалярное) – уравнением наблюдения. Такая модель позволяет формировать процесс с характеристиками, определенными матрицей состояния. Далее рассмотрим единичные реализации в фиксированном интервале времени, принимая их как отрезок этого процесса. Для получения данной реализации используем уравнения состояния (2) с заданной для каждого типа процесса матрицей состояния F , формирующей эту реализацию, начиная от конкретных начальных условий $\mathbf{x}(0)$. При этом в (2) $G_{ii} = 0$, $i = \overline{1, m}$.

Описание конкретной формы подлежащей прогнозированию неустойчивости (линейный уход, степенная функция или квазигармоническая форма неустойчивости) определяется конкретным

видом генератора и его использованием. Так, например, если генератор имеет неустойчивость не хуже 10^{-9} и используется как опорный для формирования телевизионной развертки, в качестве формы может рассматриваться линейный уход генератора [4].

Оценка и прогнозирование параметров модели неустойчивостей. Уравнения для оценивания вектора состояния модели, описываемой (2) при $m = 2$ (т. е. при описании вектора полиномом второго порядка), рассматриваемой далее в расчетах, могут быть получены в виде [6]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= F \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \hat{V}(t) \times \\ &\times D[\mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)]N^{-1}[r(t) - \hat{x}_1(t)] = \\ &= F \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{M}(t)[r(t) - \hat{x}_1(t)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$t \in [0, T_{\text{оц}}];$$

$$\begin{aligned} \hat{V}(t) &= D^T[F \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)] \cdot \hat{V}(t) + \\ &+ \hat{V}(t) \cdot D[F \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)] + G \cdot K_{\mathbf{u}} \cdot G^T + \\ &+ \hat{V}(t) \cdot D[D[H \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)]N^{-1}\{r(t) - \hat{x}_1(t)\}] \cdot \hat{V}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$t \in [0, T_{\text{оц}}];$$

где $\hat{\mathbf{x}}(t) = [\hat{x}_1(t) \ \hat{x}_2(t)]^T$; $F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$;

$$D(\cdot) = D[\partial(\cdot)_j / \partial x_i]$$

– матрица Якоби (j, i – номера столбцов и строк соответственно); $\mathbf{H} = [1 \ 0]$;

$$\hat{V}(t) = \begin{bmatrix} \hat{V}_{11}(t) & \hat{V}_{12}(t) \\ \hat{V}_{21}(t) & \hat{V}_{22}(t) \end{bmatrix}$$

– ковариационная матрица ошибок;

$$\mathbf{M}(t) = \hat{V}(t) \cdot D[\mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)]N^{-1}; \quad t \in [0, T_{\text{оц}}].$$

После подстановки соответствующих значений элементов в (3) и (4) и выполнения ряда операций над матрицами для установившегося состояния ($\dot{\hat{V}}(t) = 0$) получим:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_2(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \hat{V}_{11} \\ \hat{V}_{21} \end{bmatrix} [r(t) - \hat{x}_1(t)]; \quad (5)$$

$$0 = K_{\mathbf{u}11} + \hat{V}_{21} + \hat{V}_{12} - \hat{V}_{11}^2;$$

$$0 = \hat{V}_{22} - (1/N)\hat{V}_{11}\hat{V}_{12};$$

$$0 = -(1/N)\hat{V}_{21}^2,$$

откуда $\hat{V}_{21} = 0$; $\hat{V}_{11} = \sqrt{K_{\mathbf{u}11}/N}$ и, следовательно,

$$\mathbf{M}(t) = \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sqrt{K_{\mathbf{u}11}/N} & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Уравнение (5) – уравнение оценки вектора состояния в процессе идентификации его параметров. Второе слагаемое в правой части уравнения (5) является корректирующим, уменьшающим расхождение начальных (априорных) значений вектора состояния от истинных.

Уравнения для прогнозирования вектора состояния $\hat{x}(t)$ имеют следующий вид [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \hat{x}_2 & 0 \end{bmatrix}^T, t \in [T_{\text{оц}}, T].$$

где $t \in [T_{\text{оц}}, T]$ – интервал прогнозирования; $\hat{x}(T_{\text{оц}})$ – начальные условия системы уравнений в интервале прогнозирования.

Примеры решения задач оценки и прогнозирования долговременных составляющих нестабильностей. На основе уравнений (5) и (6) в программе Simulink реализованы модели оценки и прогнозирования параметров вектора состояния. Для каждой модели получены математическое описание, компьютерная модель и графическое представление результатов оценки долговременной составляющей нестабильности и ее прогнозирования. Рассмотрены четыре модели ухода долговременной составляющей шкалы синхронизации:

- линейная;
- квадратичная;
- квазигармоническая;
- сумма квадратичной и квазигармонической функций.

Схема модели процесса нестабильности, оценки долговременной составляющей и ее прогнозирования приведена на рис. 3. Долговременная составляющая нестабильности ($g(t) + y(t)$ – см. рис. 1) формируется генератором нестабильности ГН1. При сложном законе нестабильности отдельные составляющие формируются генераторами ГН1 и ГН2 и суммируются в сумматоре $\Sigma 1$. Блоком НУ задаются начальные условия генерации. В сумматоре $\Sigma 2$ к сформированному сигналу добавляются быстрые флуктуации ("шумы" $\eta(t)$), не подлежащие прогнозированию. Сформированный сигнал нестабильности отображается на индикаторе И1.

Остальная часть схемы оценивает долговременную составляющую нестабильности на интервале $[0, T_{\text{оц}}]$ и прогнозирует ее на интервале $[T_{\text{оц}}, T]$ (блок ОН). Переход от оценки к прогнозированию происходит при переключении переключателя П, управляемого генератором импульсов ГИ (верхнее положение соответствует оценке нестабильности, нижнее – ее прогнозированию). Необходимый коэффициент передачи \mathbf{M} устанавливается масштабирующим усилителем. На индикаторе И2 отображается отличие результата прогнозирования от реальной кривой нестабильности.

Уход долговременной составляющей шкалы синхронизации, описываемый линейной функцией. В данной ситуации $x(0) = [x_1(0) \ 0]^T$ и модель нестабильности линейного типа имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= u_1; \\ r(t) &= x_1(t) + n(t); \\ t &\in [0, T], x_1(0) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $u_1 = \text{const}$.

Алгоритм оценивания функции $x(t)$ на интервале $t \in [0, T_{\text{оц}}]$ в соответствии с (5) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} + \mathbf{M} [r(t) - \hat{x}_1(t)]. \quad (8)$$

Переменная $\hat{x}_2(t)$ введена для оценки постоянной $u_1 = \sqrt{K_{\text{ул1}}}$ в (7).

Алгоритм прогнозирования на интервале $t \in [T_{\text{оц}}, T]$ в соответствии с (8) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix},$$

где $\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) & \hat{x}_2(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(T_{\text{оц}}) & \hat{x}_2(T_{\text{оц}}) \end{bmatrix}^T$.

Результаты формирования сигнала нестабильности, отображаемые индикатором И1, представлены на рис. 4, а. На рис. 4, б показано отображение на индикаторе И2 ошибки оценивания $\Delta x_1 = x_1 - \hat{x}_1$ на интервале $0 \dots 5$ с и ее прогнозирования на интервале $5 \dots 10$ с.

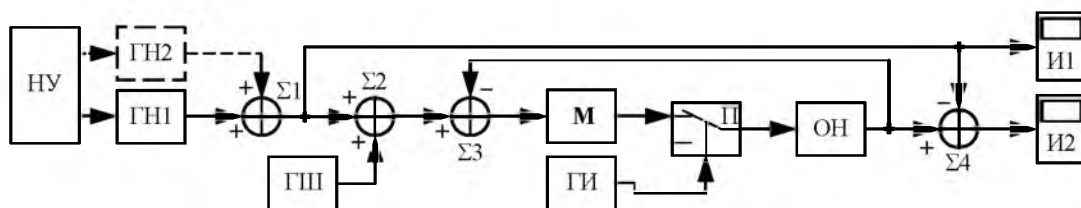


Рис. 3

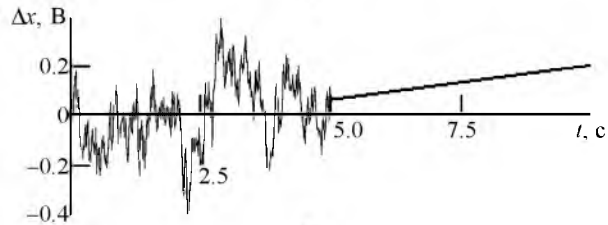
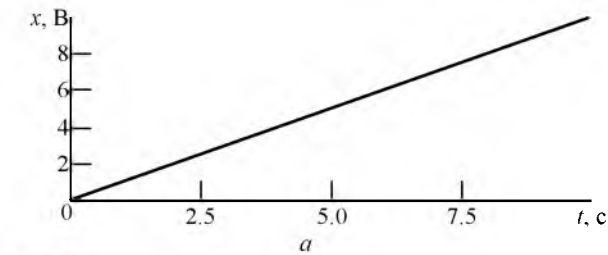


Рис. 4

Уход долговременной составляющей шкалы синхронизации, описываемый степенной функцией второго порядка. Модель нестабильности такого типа принята в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1; \quad (9)$$

$$r(t) = x_1(t) + n(t);$$

$$t \in [0, T], x(0) = 0,$$

где $u_1 = \sqrt{K_{u11}}$ – const.

Алгоритм оценивания функции $x(t)$ в соответствии с (5) можно записать как

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \end{bmatrix} + \mathbf{M} [r(t) - \hat{x}_1(t)], \quad (10)$$

где \mathbf{M} определяется по (6); $t \in [0, T_{\text{оц}}]$ – интервал оценивания долговременной составляющей $r(t)$. Функция $\hat{x}_3(t)$ введена для оценки постоянной u_1 в (9).

Алгоритм прогнозирования в соответствии с (10) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \end{bmatrix}, \quad t \in [T_{\text{оц}}, T];$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) & \hat{x}_2(t) & \hat{x}_3(t) \end{bmatrix}^T =$$

$$= \begin{bmatrix} \hat{x}_1(T_{\text{оц}}) & \hat{x}_2(T_{\text{оц}}) & \hat{x}_3(T_{\text{оц}}) \end{bmatrix}^T.$$

По аналогии с предыдущим примером на рис. 5, а показан сформированный сигнал нестабильности, на рис. 5, б – ошибка оценивания и ее прогноз.

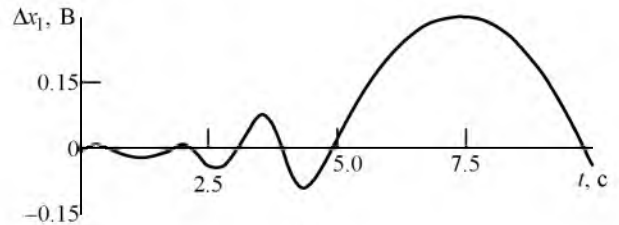
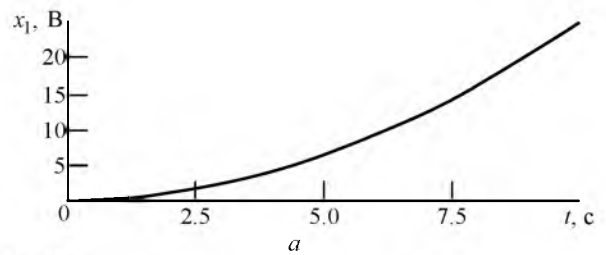


Рис. 5

Уход долговременной составляющей шкалы синхронизации в виде квазигармонической функции. Модель нестабильности такого типа принята в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_1;$$

$$r(t) = x_1(t) + n(t);$$

$$t \in [0, T]; x_1(0) = 0,$$

где $u_1 = \sqrt{K_{u11}}$ – const.

Алгоритм оценивания функции $x(t)$ в соответствии с (5) можно записать как

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -(2.9)^2 & 2 & 2.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \end{bmatrix} +$$

$$+ \mathbf{M} [r(t) - \hat{x}_1(t)],$$

где \mathbf{M} определяется по (6); $t \in [0, T_{\text{оц}}]$. Переменная $\hat{x}_3(t)$ введена для оценки частоты сигнала нестабильности.

Алгоритм прогнозирования в соответствии с уравнением (8) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -(2.9)^2 & 2 & 2.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \end{bmatrix}; \quad t \in [T_{\text{оц}}, T],$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) & \hat{x}_2(t) & \hat{x}_3(t) \end{bmatrix}^T =$$

$$= \begin{bmatrix} \hat{x}_1(T_{\text{оц}}) & \hat{x}_2(T_{\text{оц}}) & \hat{x}_3(T_{\text{оц}}) \end{bmatrix}^T.$$

Сформированный сигнал нестабильности представлен на рис. 6, а, ошибка оценивания и ее прогноз – на рис. 6, б.

Уход долговременной составляющей шкалы синхронизации в виде суммы квазигармонической

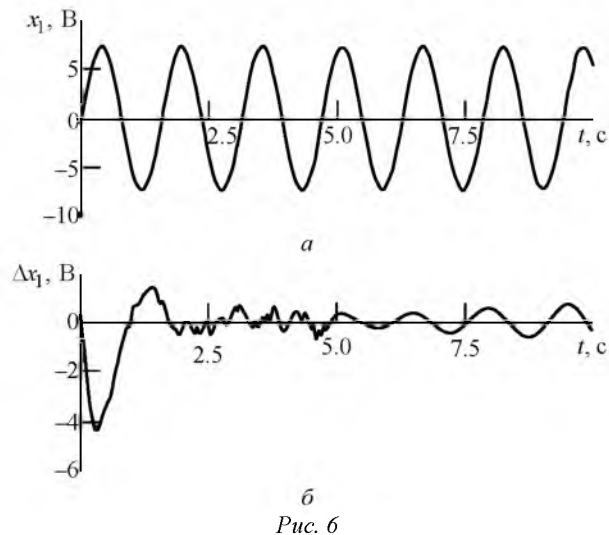


Рис. 6

функции и степенной функции второго порядка. Формирование слагаемых долговременных уходов рассмотрено ранее. Результаты формирования сигнала неустойчивости и ошибки прогнозирования этого сигнала приведены на рис. 7.

Прогнозирование позволяет значительно повысить стабильность шкал синхронизации и может быть реализовано различными вычислительными

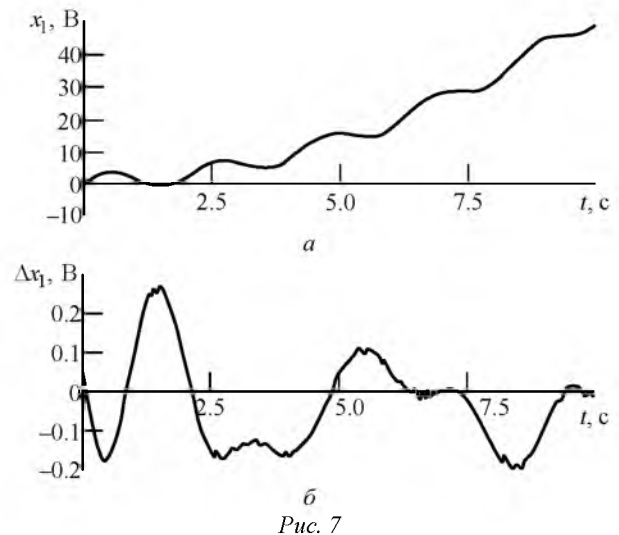


Рис. 7

средствами – от универсальных ЭВМ до микропроцессорных вычислительных устройств.

Рассмотренные математические модели предполагают априорные знания характера предполагаемых для прогнозирования долговременных неустойчивостей. Приведенные примеры охватывают практически все наблюдаемые на практике уходы шкал синхронизации, построенных на основе опорных кварцевых генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов П., Барнс Дж. Высокоточное воспроизведение единиц времени и частоты // *Время и частота*: сб. ст. / пер. с англ.; под ред. Дж. Джесперсена, Б. Блейра, Л. Геттерера. М.: Мир, 1973. 213 с.
2. <http://ptime.ru/oscillators.html> (дата обращения 09.03.2016).
3. http://studopedia.ru/1_16652_standarti-chastoti-i-vremeni.html (дата обращения 09.03.2016).
4. Круглов А. С. Разработка алгоритмов и устройств формирования шкал синхронизации систем переда-

чи сигналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / НИИ ПТ "Растр". Новгород, 1991. 15 с.

5. Макшанов А. В., Смирнов А. В., Шашкин А. К. Робастные методы обработки сигналов в радиотехнических системах синхронизации. СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 1991. 173 с.

6. Снайдер Д. Метод уравнений состояний для непрерывной оценки в применении к теории связи. М.: Энергия, 1973. 104 с.

V. E. Lankin

Southern Federal University (Taganrog)

A. K. Shashkin

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Prediction of Scale Synchronization Instability

The models of care of synchronization scales based on quartz frequency standards are considered. Based on the models of long-term care scales algorithms to estimate parameters of these processes and their prediction are created. Solutions for some particular types of instabilities are given.

Scale synchronization, quartz generator, instability of quartz generator, prediction of instability, mathematical of model instability, prediction of the scale synchronization

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2016 г.