УДК 621.396

Е.С. Козелкова

ГП «Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления», Киев

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ УГЛОМЕСТНОЙ СИСТЕМЫ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье приведен анализ устойчивости нелинейной угломестной системы командно-измерительной системы радиотехнического комплекса.

Ключевые слова: *космический аппарат, радиотехнический комплекс.*

Введение

Одна из проблем, стоящих при разработке радиотехнических комплексов (РТК) космических аппаратов (КА) – устойчивость угломерных устройств сверхвысокочастотного диапазона радиосигналов (СВЧ) и крайневысокочастотного диапазона радиосигналов (КВЧ) командно-измерительной системы (КИС), которая рассматривалась в [1 – 5]. **Цель данной статьи** – проведение анализа влияния нелинейных динамических процессов на устойчивость нелинейной угломестной системы КИС РТК, основываясь на результатах, полученных в [1 – 5].

Основная часть

Исследуем с помощью функциональных рядов Вольтерра область устойчивой работы КИС РТК. Мажорирующий ряд будет иметь вид

$$\|\Phi\| = \sum_{i=1}^{\infty}\|\Phi_i\|, \qquad (1)$$

где

$$\|\Phi_i\| = \max_{-\infty<t<\infty}|E_i[t]| = \max_{-\infty<t<\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}d\tau_1\ldots d\tau_i h_i(\tau_1,\ldots,\tau_i)\prod_{j=1}^{i}x(t-\tau_j).$$

Разложим нелинейность фазового детектора угломестной системы в ряд Тейлора и, ограничиваясь, первыми двумя членами разложения, получим:

$$\sin E = E - 1/3!\ \cdot E^3. \qquad (2)$$

Для нелинейности типа $f(\cdot) = C_1(\cdot) + C_m(\cdot)^m$, где m – положительное число больше 2, выражение (1) будет иметь вид

$$\|\Phi_1\| = \|\Phi\| - \|g_1\||C_m|\|\Phi\|^m, \qquad (3)$$

как определено в работах [1, 2], точки на плоскости, в которых $\frac{dF(\Phi)}{d\Phi} = 0$, удовлетворяют уравнению

$$1 - m\|g_1\||C_m|\|\Phi\|^{m-1} = 0, \qquad (4)$$

решение (14) дает m – 1 решений $\Phi^{(1)}, \Phi^{(2)},\ldots, \Phi^{(m-1)}$ вида $b(j,Z_v)$, где $b = \left(\frac{1}{m\|g_1\||C_m|}\right)^{-m+1}$; $Z_v = \frac{2\pi}{m-1}$; $v = 0, 1, 2, \ldots, m-2$. Пусть теперь контур аналитичности С на плоскости Ф, на котором существуют все функциональные производные Ф, являются окружностью с радиусом r < b и с центром в начале координат. Отображения С, r на плоскости $\|\Phi_1\|$ имеет вид [2]

$$\|\Phi_1\|_\Gamma = r[(\cos\theta - \|g_1\||C_m|r^{m-1}\cos m\theta) + {}$$
$$+ j(\sin\theta - \|g_1\||C_m|r^{m-1}\sin m\theta)]. \qquad (5)$$

Преобразование (5) дает

$$\|\Phi_1\|_\Gamma = r\exp(j\theta) - \|g_1\||C_m|r^m\exp(jm\theta), \qquad (6)$$

где $0 \le \theta \le 2\pi$, r < b.

Допуская изменение θ в приведенном выше уравнении от 0 до 2π получим простой замкнутый контур r на плоскости $\|\Phi_1\|$, содержащей начало координат. Ближайший к началу координат контур r можно определить минимизируя $\|\Phi_1\|_\Gamma$ по θ. Для (6) имеем [2]

$$\min_{0\le\theta\le 2\pi}\|\Phi_1\|_\Gamma = \min_{0\le\theta\le 2\pi}\left\{r\sqrt{\|g_1\|^2|C_m|^2 r^{2(m-1)} - 2\|g_1\||C_m|\times r^{m-1}\cos[(m-1)\theta]+1}\right\} =$$
$$= r\sqrt{\|g_1\|^2|C_m|^2 r^{2(m-1)} - 2\|g_1\||C_m|r^{m-1}+1} =$$
$$= r(1 - \|g_1\||C_m|r^{m-1}), \qquad (7)$$

где r < b.

Чем меньше r по сравнению с b, тем меньше и $\min_{0\le\theta\le 2\pi}\|\Phi_1\|_\Gamma$. Тогда для следящего устройства КИС с нелинейностью (3) ряд Вольтерра будет сходиться, когда [1 – 3]

$$\|\Phi_1\| = \max_{-\infty<t<\infty}|E_1(t)| < \frac{m-1}{m}\left(\frac{1}{m\|g_1\||C_m|}\right)^{\frac{1}{m-1}}, \qquad (8)$$

где

$$\|g_1\| = \int_{-\infty}^{\infty}\left|a_p^{-1}[G_1(p)]\right|dt. \qquad (9)$$

Знак a_p^{-1} обозначает обратное преобразование Лапласа функции, стоящей в квадратных скобках

$$G_1(p) = K(p)H_1(p)U_c\,, \qquad (10)$$

где K(p) – передаточная функция пропорционально интегрирующего фильтра, причем $K(p) = \frac{1/T}{p + 1/T}$; $H_1(p)$ – ядро Вольтерра первого порядка, причем $H_1(p) = \frac{1}{p + U_c K(p)}$; U_c – полоса удержания, причем $U_c = SyИ_{ФДmax}$.

Применительно к угломестной КИС [4] m = 3, C = 1, $C_m = C_3 = -1/3!$.

Тогда выражение (10) можно записать

$$G_1 = \frac{U_c - 1/T}{p^2 + (1/T)p + U_c(1/T)C}. \qquad (11)$$

Если корни уравнения

$$p^2 + \frac{1}{T}p + U_c\frac{1}{T} = 0 \qquad (12)$$

действительны и отрицательны (в случае сильного затухания, что характерно для поиска АПУ), то [2]

$$\|g_1\| = \frac{1}{C_1} = 1\,. \qquad (13)$$

Если корни уравнения (12) комплексные с отрицательной реальной частью (случай слабого затухания, что характерно для сопровождения АУ КИС), то [2]

$$\|g_1\| = \frac{\left(1 - \exp\frac{Д\pi}{F}\right)}{1 - \exp\frac{Д\pi}{F}}, \qquad (14)$$

где $Д = -\frac{1}{2T}$; $F = \frac{1}{2}\sqrt{4\Omega_у\,1/T - \Omega_у^2}$.

В случае сильного затухания в РТК с учетом (12) и (13) имеем

$$\|\Phi_1\| < 2/3\left(\frac{1}{3! - 1/6}\right)^{1/2} = 0,27\,; \qquad (15)$$

$$\|\Phi\| = \|\Phi_1\| + \frac{|C_3|}{|C_1|}\|\Phi_1\|^3 = 0,27 + \frac{1}{6}\cdot 0,019 = 0,273\,. \quad (16)$$

Для нелинейности типа (3) область устойчивой работы РТК определяется выражением [4, 5]

$$U_c = \frac{U_c C_1(m-1)}{m}\left(\frac{C_1}{m|C_m|}\right)^{-m+1}. \qquad (17)$$

Подставив (11) в (17) получим

$$U = U_c\,2/3\sqrt{3} \approx U_c\,,$$

т.е. в общем случае

$$\lim_{n\to\infty} U = U_c\,. \qquad (18)$$

Выводы

Таким образом, область устойчивой работы РТК совпадает с полосой устойчивого сопровождения в том случае, если нелинейность фазового детектора следящей системы имеет вид (3), а в качестве фильтра нижних частот используется интегрирующий фильтр. Полученный результат в основном подтверждает вывод, приведенный в работах [1, 2, 5], где указывается, что в таком РТК, с точки зрения устойчивой работы, не накладывается никаких ограничений на величину полосы удержания, определяемой выражением (11). Перспектива дальнейших исследований – разработка соответствующей имитационной модели.

Список литературы

1. *Пупков К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко. – М.: Наука, 1978. – 448с.*
2. *Landau M. Application of the Volterra Series to the Angle Track Loop / M. Landau, C.T. Leondes // Trans.IEEE. – 1972. – V.AES-8, № 3. – P. 306-318.*
3. *Иванов М.А. Некоторые вопросы исследования нелинейных процессов в системах с помощью функциональных рядов Вольтерра / М.А. Иванов // Мат. сем. “Нелинейные эффекты в радиоприемных и усилительных устройствах”; НТОРЭС им. А.С.Попова. – М.: Радио и связь, 1979. – 150 с.*
4. *Козелков С.В. Системы наведения и автосопровождения антенных устройств радиолиний СВЧ и КВЧ диапазонов / С.В. Козелков // Труды 10 НТК в/ч 32103. Научно-практические аспекты управления космической и наземной группировками, особенности их применения. – МО СССР, 1989. – С. 223.*
5. *Козелков С.В. Наземный радиотехнический комплекс управления и идентификации космических аппаратов двойного назначения среднего и дальнего космоса: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.21 / С.В. Козелков. – Х., 2000. – 457 с.*

Поступила в редколлегию 3.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ НЕЛІНІЙНОЇ КУТОМІСНОЇ СИСТЕМИ КОМАНДНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РАДІОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

К.С. Козелкова

У статті приведено аналіз стійкості нелінійної кутомісної системи командно-вимірювальної системи радіотехнічного комплексу.

Ключові слова: *космічний апарат, радіотехнічний комплекс.*

ANALYSIS OF STABILITY OF NONLINEAR ELEVATION THE COMMAND-MEASURING SYSTEM OF RADIO ENGINEERING COMPLEX

Ye.S. Kozelkova

The analysis of stability of the nonlinear elevation of the command-measuring system of radio engineering complex is resulted in the article.

Keywords: *space vehicle,radio engineering complex.*