

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 крайневых высокочастотного 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

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

$$\|\Phi_i\| = \max_{-\infty < t < \infty} |E_i[t]| =$$

$$= \max_{-\infty < t < \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \dots dt_i h_i(\tau_1, \dots, \tau_i) \prod_{j=1}^i x(t - \tau_j).$$

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

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

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

$$\|\Phi_i\| = \|\Phi\| - \|g_1\| \|C_m\| \|\Phi\|^m, \quad (3)$$

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

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

решение (14) дает $m - 1$ решений $\Phi^{(1)}, \Phi^{(2)}, \dots, \Phi^{(m-1)}$

вида $b(j, Z_v)$, где $b = \left(\frac{1}{m \|g_1\| \|C_m\|} \right)^{-m+1}$; $Z_v = \frac{2\pi}{m-1}$;

$v = 0, 1, 2, \dots, m - 2$. Пусть теперь контур аналитичности C на плоскости Φ , на котором существуют все функциональные производные Φ , являются окружностью с радиусом $r < b$ и с центром в начале координат. Отображения C, r на плоскости $\|\Phi_1\|$ имеет вид [2]

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

Преобразование (5) дает

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

где $0 \leq \theta \leq 2\pi, r < b$.

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]

$$\begin{aligned} \min_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \|\Phi_1\|_{\Gamma} &= \min_{0 \leq \theta \leq 2\pi} \left\{ r \sqrt{\|g_1\|^2 \|C_m\|^2 r^{2(m-1)} - 2 \|g_1\| \|C_m\| \times} \right. \\ &= r \sqrt{\|g_1\|^2 \|C_m\|^2 r^{2(m-1)} - 2 \|g_1\| \|C_m\| r^{m-1} + 1} = \\ &= r(1 - \|g_1\| \|C_m\| r^{m-1}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $r < b$.

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

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

$$\text{где } \|g_1\| = \int_{-\infty}^{\infty} |a_p^{-1}[G_1(p)]| dt. \quad (9)$$

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

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

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

$$H_1(p) = \frac{1}{p + U_c K(p)}; U_c – \text{полоса удержания, причем}$$

$$U_c = \text{Sy}I_{\text{Фдmax}}.$$

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

Тогда выражение (10) можно записать

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

Если корни уравнения

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

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

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

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

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

$$\text{где } D = -\frac{1}{2T}; F = \frac{1}{2} \sqrt{4\Omega_y \frac{1}{T} - \Omega_y^2}.$$

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

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

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

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

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

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ НЕЛІНІЙНОЇ КУТОМІСНОЇ СИСТЕМИ КОМАНДНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РАДІОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

К.С. Козелкова

У статті приведено аналіз стійкості нелінійної кутомісної системи командно-виміральної 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.

Подставив (11) в (17) получим

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

т.е. в общем случае

$$\lim_{n \rightarrow \infty} U = U_c. \quad (18)$$

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 радиолоний 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.