параметра a_{3*}, когда все собственные числа линеаризованной системы становятся комплексными с отрицательными вещественными частями. При увеличении параметра b (при $a > a_{1*}$, $a_{1*} = 3$) существует критическое значение этого параметра b_{3*}, когда два собственных числа становятся вещественными и отрицательными.

Параметрический анализ линеаризованной системы с точки зрения устойчивости конечного положения равновесия показывает, что изменение конечной длины троса приводит к тем же выводам с точки зрения изменения параметров a и b.

Литература

1. Dong, Z. Motion modeling and deployment control of a long tethered spacecraft system with an atmospheric sounder / Z. Dong, Y.M. Zabolotnov, C. Wang // Engineering Letters. – 2018. – Vol. 26. – No. 4. – PP. 478-488.

2. Дон, Ч. Анализ динамики развёртываемой космической тросовой системы с атмосферным зондом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4 (4). С. 726-732.

3. Kruijff, M. Tethers in Space. – Netherlands: Delta-Utec Space Research, 2011. 432 p.

А.В. Елизарова

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И ЗАПЗАДЫВАНИЕМ

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

Известно большое количество работ, посвященных исследованию систем автоматического управления (САУ) с запаздыванием по управлению с одним входом и одним выходом. Многомерным (многосвязным) системам управления с запаздываниями посвящено небольшое количество научных работ.

Как правило, влияние запаздываний на процессы управления негативно. Поэтому методы исследования систем управления для объектов, не учитывающие фактор запаздывания, оказываются малоэффективными. Проблема конструирования подобных систем управления еще более усложняется в случае, если объект управления является многосвязным и нелинейным.

В работе предлагается исследование многосвязной нелинейной системы автоматического управления объектом с запаздываниями (по управлению и выходу) частотными методами, на основе метода гармонической линеаризации и системного описания характеристик МСАУ [3].

Будем считать, что данный класс многосвязных систем состоит из множества идентичных сепаратных и взаимные связи между подсистемами однократные (рис.1).

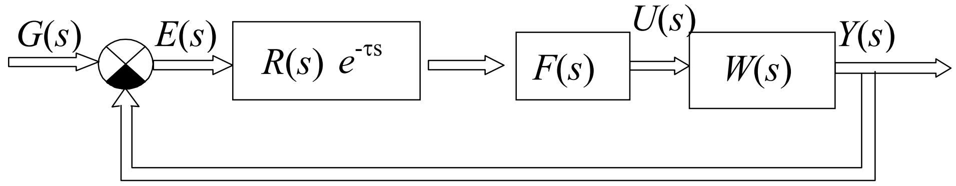


Рисунок 1 – Структура нелинейной однотипной МСАУ с запаздыванием

Для систем с нелинейностями в прямых каналах сепаратных подсистем) в качестве локальной характеристики гармонически линеаризованной *i*-ой подсистемы можно рассмотреть ее передаточную функцию Ф*i*(s,a) в режиме управления:

$$\Phi_i(s,a)=\frac{W_{\text{н}i}[q_i(a),q_i^{/}(a)]W_{ii}(s)\mathrm{e}^{-\tau s}}{1+W_{\text{н}i}[q_i(a),q_i^{/}(a)]W_{ii}(s)\mathrm{e}^{-\tau s}}, \qquad (1)$$

где $W_{\text{н}i}[q_i(a),q_i^{/}(a)]$ - передаточная функция гармонически линеаризованного нелинейного элемента *i*-ой сепаратной подсистемы; $q(a), q^{/}(a)$ - коэффициенты гармонической линеаризации; $W_{ii}(s)\,e^{-\tau s}$ - передаточные функции линейного многомерного объекта с запаздыванием τ по *i*-му каналу и регулятора *i*-ой сепаратной подсистемы.

Для класса нелинейных однотипных МСАУ справедлива гипотеза идентичности динамических характеристик гармонически линеаризованных подсистем, содержащих в своем составе идентичные нелинейные элементы:

$$\Phi_1[q_1(a),q_1^{/}(a),s]=\Phi_2[q_2(a),q_2^{/}(a),s]=\ldots=\Phi[q(a),q^{/}(a),s].$$

Характеристическое уравнение гармонически линеаризованной однотипной МСАУ можно записать в следующей форме [2]:

$$1+h_2\Phi^2[q(a),q^{/}(a),s]+h_3\Phi^3[q(a),q^{/}(a),s]+\ldots+h_n\Phi^n[q(a),q^{/}(a),s]=0, \qquad (2)$$

где h_i ($i=\overline{2,n}$) - обобщенные числовые характеристики многомерных элементов связи между сепаратными подсистемами, вычисляемые по формулам, предложенным в [2].

Ведем в рассмотрение алгебраическое уравнение связи относительно некоторой переменной $x=\Phi[q(a),q^{/}(a),s]$, полученное из (2): $1+h_2x^2+h_3x^3+\ldots+h_nx^n=0$ (3)

$\{x_i\}$ - множество корней уравнения (3), где $i=1,2\,..n$

По частотному критерию: условием наличия в данной системе периодических движений (ПД) является прохождение локальной амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФХ) Ф(a,jω) гармонически линеаризованной подсистемы через один из корней множества $\{x_i\}$, играющих роль критических точек.

При изменении $0<a<\infty$ деформируется форма годографа Ф(a,*j*ω). В общем случае критической точкой будет корень $x^*_i=\alpha_i-j\beta_i$, через которую проходит АФХ Ф(a,*j*ω). Тогда справедливо равенство

$$\Phi(a,j\omega)=\frac{W_{\text{н}i}[q_i(a),q_i^{/}(a)]W_{ii}(s)e^{-\tau s}}{1+W_{\text{н}i}[q_i(a),q_i^{/}(a)]W_{ii}(s)e^{-\tau s}}=x^*{}_i, \qquad (4)$$

Наличие ПД в нелинейной МСАУ с запаздыванием в перекрестных связях выполнение условия:

$$\Phi_i(s,a)=\frac{W_{\text{н}i}(a)W_{ii}(s)}{1+W_{\text{н}i}(a)W_{ii}(s)}=x_i^*(s,\tau) \qquad (5)$$

Таким образом, на основе равенства (4) и (5) можно, используя частотные методы, определить параметры амплитуды a_i^* и частоты ω_i^* ПД в нелинейных однотипных МСАУ с запаздыванием и оценить их устойчивость [3].

Определяем параметры, амплитуду a_i^* и частоту ω_i^*, периодических движений. Выделим линейные и нелинейные характеристики разомкнутой подсистемы из уравнения (4):

$$\text{W}_\text{н}(a)\text{W}(j\omega)\,e^{-\tau j\omega}=\frac{\Phi\ (a,j\omega)}{1-\Phi\ (a,j\omega)}, \qquad (6)$$

где W$_\text{н}$(a)= $q(a)+jq^{/}(a)$,

$$W_з(j\omega=)W(j\omega)e^{-\tau j\omega}=(U(\omega)+jV(\omega))(\cos\omega\tau-j\sin\omega\tau)=$$
$$=(U(\omega)\cos\omega\tau-V(\omega)\sin\omega\tau)+j(V(\omega)\cos\omega\tau-U(\omega)\sin\omega\tau)=$$
$$=U_з(\omega)+jV_з(\omega).$$

Подставляем $x^*{}_i$ вместо $\Phi(a,j\omega)$ в уравнение (6):

$$\text{W}_\text{н}(\text{a})\text{W}_з(j\omega)=\frac{x_i^*}{1-x_i^*}=c_i+jd_i. \qquad (7)$$

Для решения уравнения (7) выделим линейные части системы и воспользуемся двумя скалярными уравнениями:

$$\begin{cases}|W_з(j\omega)|=\dfrac{|c_i+jd_i|}{|W_\text{н}(a)|};\\ \arg Wз(j\omega)=\ \arg(c_i+jd_i)-\arg W\text{н}(a);\end{cases}$$

или можно записать

$$\begin{cases}\sqrt{U_з^{\,2}(\omega)+V_з^{\,2}(\omega)}=\dfrac{\sqrt{c_i^2+d_i^2}}{\sqrt{q^2(a)+\left[q^{/}(a)\right]^2}}\\ \operatorname{arctg}\dfrac{Vл(\omega)}{Uл(\omega)}-\operatorname{arctg}(\omega t)=\operatorname{arctg}\left(\dfrac{d_i}{c_i}\right)-\operatorname{arctg}\left(\dfrac{q^{/}(a)}{q(a)}\right);\end{cases}.$$

Решив систему из двух уравнений, найдем значения a^* и ω^*.

Анализ устойчивости периодических движений в нелинейной МСАУ

Для определения параметров ПД и анализа их устойчивости можно воспользоваться графоаналитическим методом, состоящим из следующих этапов:

1. Найдем корни x_i уравнения связи (3);

2. Из уравнения (7) выделим линейную и нелинейную части системы: Wз(jω)= $Z_н^*(ja)$, где $Z_н^*(ja)=\frac{1}{W_н(a)}\frac{x_i^*}{1-x_i^*}=\frac{c_i+jd_i.}{W_н(a)}$.

3. Построим на комплексной плоскости $W_з(j\omega)$ и $Z_н^*(ja)$;

4. Определим параметры a_i^* и ω_i^* периодических движений по точке пересечения характеристик $W_з(j\omega)$ и $Z_н^*(ja)$;

5. Оценить устойчивость периодических движений по частотному критерию [2].

Периодические движения в нелинейной однотипной МСАУ будут устойчивыми, если при увеличении (уменьшении) амплитуды a^* на Δa в точке, соответствующей пересечению годографов $W_з(j\omega)$ и $Z_н^*(ja)$, АФХ $W_з(j\omega)$ не охватывает новую точку $a=a^*+\Delta a$, в противном случае ПД будет неустойчивым [3].

Периодические движения в исследуемой системе устойчивые, т.к. при увеличении амплитуды a^* на Δa в точках 1 и 2, соответствующей пересечению годографов $W_з(j\omega)$ и $W(j\omega)$ с годографом $Z_н^*(ja)$, АФХ $W_з(j\omega)$ и $W(j\omega)$ не охватывают новую точку $a=a^*+\Delta a$ (рисунок 3).

Результаты подтверждают переходные процессы (рис. 4, 5), полученные путем моделирования исходной системы.

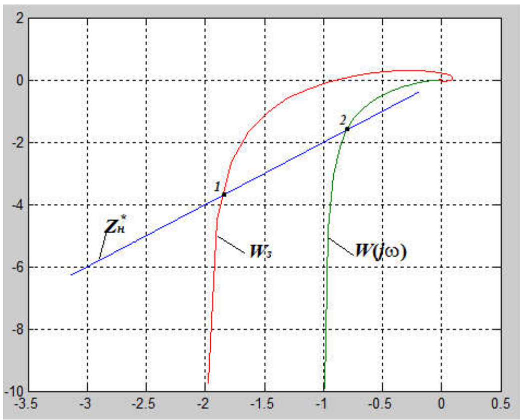
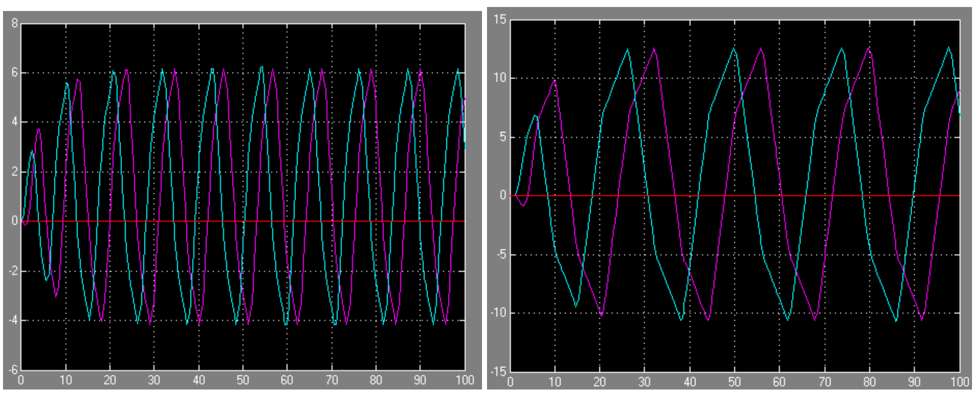


Рисунок 3 – Пересечение годографов $W_з(j\omega)$ и $W(j\omega)$ с годографом $Z_н^*(ja)$



Рисунки 4, 5 – ПД в системе с запаздыванием (т. 1) с параметрами a=4.9, ω=0.5, без запаздывания (т. 2) с параметрами a=11.8, ω=0.23

Таким образом, в работе предложен подход, сформированный на базе частотных методов и метода гармонической линеаризации, позволяющий оценить параметры и устойчивость периодических движений в однотипной нелинейной МСАУ с нелинейностями и запаздыванием в прямых каналах, также рассчитано критическое запаздывание τ=1,37.

Литература

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - СПб, Изд-во «Профессия», 2014. - 752 с.

2. Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов. Автоматика и телемеханика. 2013. № 3. с. 173-191.

3. Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с гомономными связями между подсистемами //Автоматика и телемеханика. - 1995. - №7.-С.82-90.

Н.В. Ефимушкина

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУПЕРСКАЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

(Самарский государственный технический университет)

Аннотация: Описывается подход к разработке имитационных моделей типовых центральных процессоров современных компьютеров. Моделирующая программа позволяет исследовать структуру суперскалярных процессоров и режимы их работы. Для обеспечения наглядности применяются принципы анимации.

Ключевые слова: имитация, суперскалярный процессор, конвейеры, конфликты.

Введение

Центральный процессор является основным и довольно сложным устройством современных компьютеров и систем на их основе. Исследованием этих и других устройств занимается теория вычислительных систем, которая использует аналитические, имитационные и экспериментальные методы [1, 2]. Первые характеризуются высокими погрешностями, а последние – большой сложностью и стоимостью. Наиболее предпочтительными для обучения являются методы имитационного моделирования, которые позволяют исследовать системы и устройства любой сложности с любым уровнем детализации параметров [3].

Формулировка проблемы

При разработке моделей процессоров решался ряд следующих проблем:

1) Определение структуры объекта, которая должна быть отображена в модели;