

# СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УГОЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Кудин В.Ф., проф., Максимов Д.В., студент  
кафедра автоматизации электромеханических систем и электропривода

Одной из фундаментальных задач теории автоматического управления является исследование устойчивости систем автоматического управления.

Так как в основном в реальном мире большинство процессов нелинейные, то и многие системы автоматического управления так же нелинейные.

Система автоматического управления называется нелинейной, если содержит, хотя бы один нелинейный элемент (звено)[1].

На рис. 1 приведена структурная схема нелинейной системы угловой стабилизации летательного аппарата[2]. Нелинейный элемент здесь – это реле (рис. 2) в контуре исполнительного органа (сервопривода), которое выполняет функции усилителя.

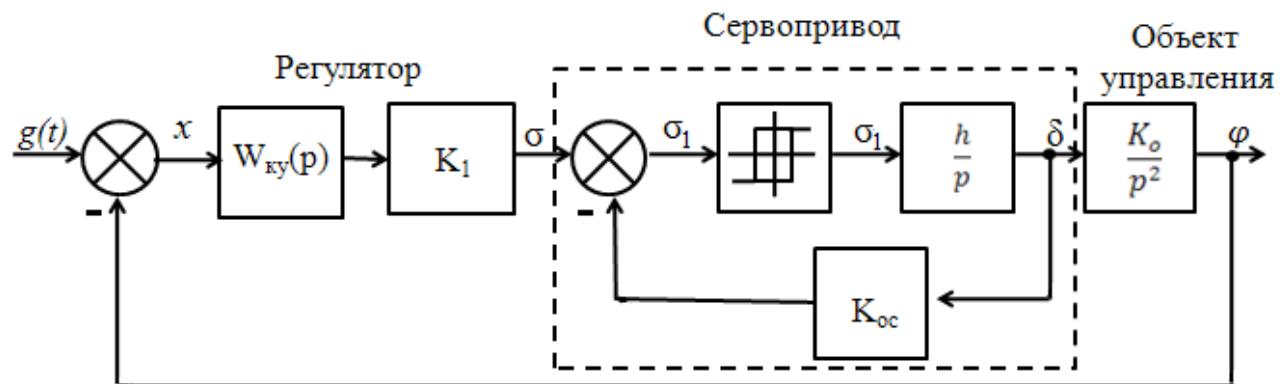


Рисунок 1 - структурная схема нелинейной системы угловой стабилизации

Параметры звеньев системы угловой стабилизации, изображенной на рис. 1:

$$K_1 = 500; K_O = 1; K_{OC} = 50; h = 1; C = 30; b = 2.$$

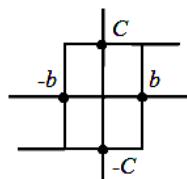


Рисунок 2 – релейная характеристика с гистерезисом ( $C=30$ ;  $b=2$ )

Изначально предполагается, что система устойчива без корректирующего устройства (передаточная функция  $W_{\text{б}} = 1$ ). Для проверки пренебрегается нелинейностью релейной характеристики, заменяя реле на линейный усилитель с коэффициентом усиления  $K_{\delta} = \frac{\tilde{N}}{b} = \frac{30}{2} = 15$ .

Проверка устойчивости проводится по критерию Найквиста в логарифмической форме [1].

Для этого рассчитывается передаточная функция нескорректированной системы угловой стабилизации  $W_{\tilde{1}}(p)$ :

$$W_{\tilde{1}}(p) = K_1 \cdot \frac{K_\delta \cdot \frac{h}{p} \cdot \frac{K_O}{p^2}}{1 + K_{oc} \cdot K_\delta \cdot \frac{h}{p}} = 500 \cdot \frac{15 \cdot \frac{1}{p}}{1 + 50 \cdot 15 \cdot \frac{1}{p}} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{100}{p^2 \left( \frac{1}{75} p + 1 \right)},$$

после чего строится ЛАФЧХ этой функции ( $W_{\tilde{1}}(p)$ ).

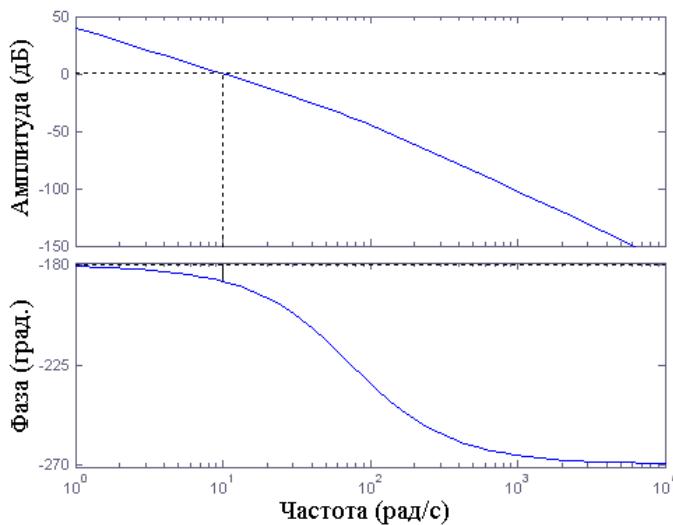


Рисунок 3 – ЛАФЧХ нескорректированной системы

После построения ЛАФЧХ видно, что в соответствии с критерием Найквиста в логарифмической форме [1] система неустойчива (на частоте среза (амплитуда = 0) отсутствует запас по фазе (фаза < -180°)). Следовательно, необходимо введение корректирующего устройства, передаточная функция которого ( $W_{\text{e}\delta}(p)$ ) определяется методом ЛАХ [1].

После синтеза последовательного корректирующего устройства (ЛАФЧХ корректирующего устройства на рис. 3,а)

$$W_{\text{e}\delta}(p) = \frac{0,0133p^2 + 1,0133p + 1}{9,9856 \cdot 10^{-6}p^2 + 0,00632p + 1}$$

и включения его в контур системы угловой стабилизации получаем устойчивую линейную систему (ЛАФЧХ которой изображено на рис. 3,б).

Полученная система – линейная (реле заменено на линейный усилитель). Необходимо исследовать, сохраняется ли устойчивость когда система нелинейная.

Для этого, в соответствии с методом гармонической линеаризации [3], нелинейное звено (реле), представляется суммой специальных коэффициентов (коэффициентов гармонической линеаризации  $q(a)$  и  $q'(a)$ ). После линеаризации передаточная функция реле

$$W_{\delta}(p,a) = q(a) + \frac{q'(a)}{\omega} \cdot p = \frac{4C}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} - \frac{4C}{\pi a^2}, \quad (1)$$

где  $a$  – амплитуда.

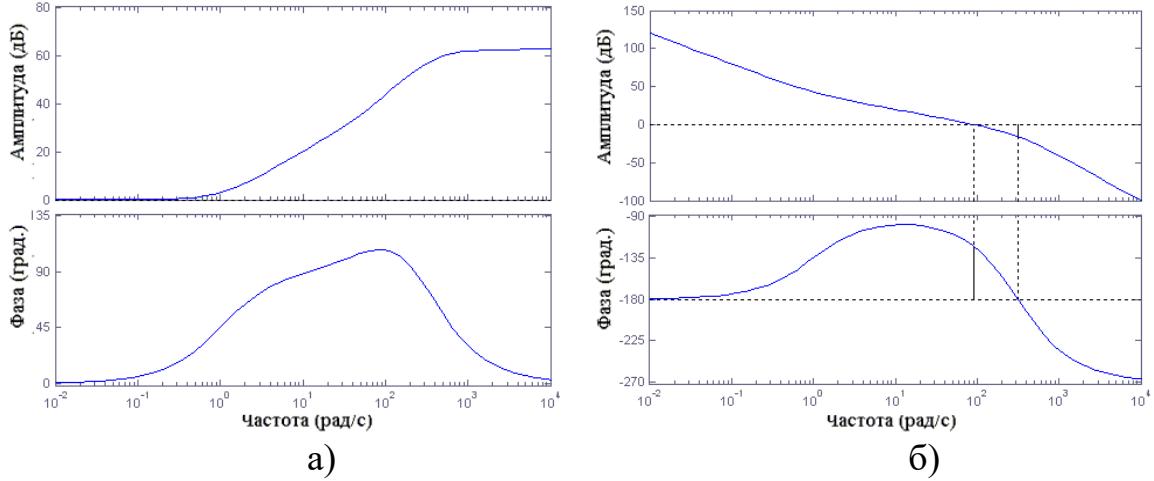


Рисунок 4 – ЛАФЧХ: а - корректирующего устройства;  
б - скорректированной системы

Метод гармонической линеаризации используется для определения наличия автоколебаний в нелинейной системе. В случае исследуемой нелинейной системы угловой стабилизации автоколебания должны присутствовать в контуре сервопривода. Расчеты показывают, что автоколебания имеют место:

характеристическое уравнение после гармонической линеаризации имеет следующий вид  $p + hK_{oc} \left[ q(a) + \frac{q'(a)}{\omega} \cdot p \right] = 0$ , а после подстановки значений, данных по условию, и подстановки  $p = j\omega$ , можно выделить вещественную и мнимую части  $X(\omega, a) = 6000\omega \sqrt{1 - \frac{4}{a^2}}$ ;  $Y(\omega, a) = 4\pi\omega^2 - 1200\omega$ . Решая

полученные уравнения как систему уравнений, определяем амплитуду автоколебаний ( $a=2$  мА) и частоту ( $\omega=954,93$  рад/с). Полученные результаты подтверждаются при моделировании (рис. 6,а).

Если наличие устойчивых автоколебаний необходимо в контуре сервопривода, то во внешнем контуре переходной процесс должен быть затухающим. Исследование автоколебаний во внешнем контуре (с учетом корректирующего устройства и объекта управления) производиться аналогично исследованию автоколебаний во внутреннем контуре (контуре сервопривода).

После структурных преобразований исходной схемы (рис. 1) и гармонической линеаризации нелинейного звена получаем новую схему (рис. 5), в которой:  $W_{\delta}(p,a)$  – передаточная функция гармонически

линеаризованной нелинейности (1), а  $W_{\ddot{e}}(p)$  – передаточная функция линейной части (2). Моделирование преобразованной схемы (рис. 5) показывает, что автоколебания отсутствуют и процесс затухающий (рис. 6,б).

$$W_{\ddot{e}}(p) = \left( -\frac{K_0}{p^2} \cdot W_{\dot{e}_0}(p) \cdot K_1 - K_{oc} \right) \cdot \frac{h}{p} = \\ = \frac{31e4p^4 + 1.9e8p^3 + 3.54e10p^2 + 3.16e11p + 3.12e11}{6241.0p^5 + 3.95e6p^4 + 6.25e8p^3}$$

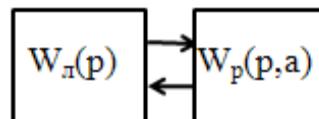


Рисунок 5 – преобразованная схема

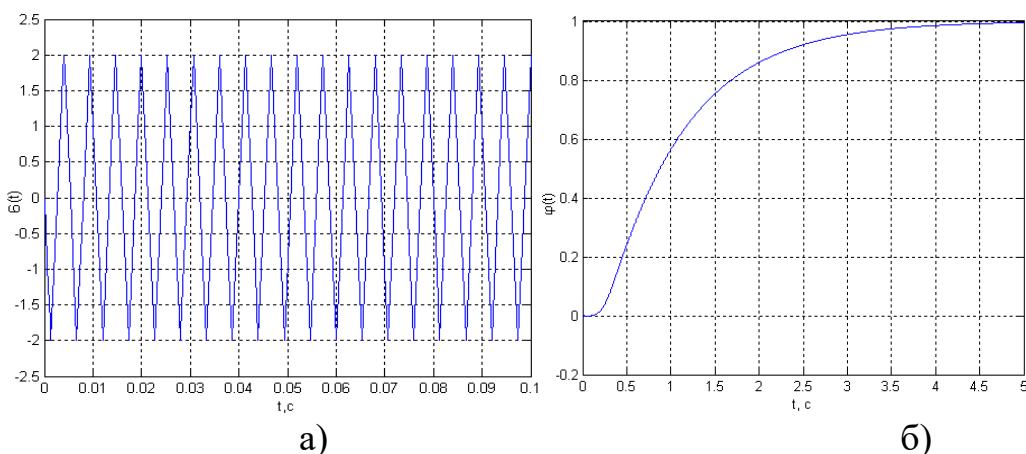


Рисунок 6 – графики переходных процессов: а – автоколебания в контуре сервопривода; б – переходной процесс скорректированной нелинейной системы

Таким образом, проведя синтез корректирующего устройства, мы получили устойчивую нелинейную систему угловой стабилизации летательного аппарата (что подтверждается при моделировании (рис. 6,б)), а с помощью метода гармонической линеаризации, провели линеаризацию нелинейного звена (реле с гистерезисом (рис. 2)) и установили наличие автоколебаний в контуре сервопривода (амплитуду и частоту).

#### Перечень ссылок

- Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
- Александров Є. Є. та ін. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Навч. посібник: У 4 т. - Т. 2: Автоматичне керування рухом літальних апаратів – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. –528 с.
- Методичні вказівки “Теорія автоматичного керування” для студентів спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”. Розділ “Нелінійні системи автоматичного керування. Наближені методи дослідження.”/Уклад.: В.Ф. Кудін – К.: КПІ, 2004. – 40 с.