НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Халматов Д.А.
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, к.т.н., доцент.
holdav2015@gmail.com
tel: +998977763858

Аннотация: *Рассмотрены вопросы настройки параметров нелинейных регуляторов систем автоматического управления технологическими процессами на основе мнимых частот. Предложен эффективный алгоритм настройки параметров регуляторов. При этом для аппроксимации входной координаты нелинейного элемента предложен метод обобщенной линеаризации. Решение задачи определения настроечных параметров регулятора определяется применением метода наименьших квадратов, который обеспечить минимизации интеграла квадратичной ошибки воспроизведения желаемого процесса с фактическим.*

Ключевые слова: *нелинейная динамическая система, переходный процесс, настройка параметров, нелинейный регулятор, метод наименьших квадратов.*

Введения

Современные задачи управления динамическими системами характеризуются высокой степенью сложности, обусловленной наличием нелинейностей, неопределённостей параметров и внешних возмущений [1]. В отличие от линейных систем, поведение нелинейных объектов

существенно зависит от амплитуды и формы входных воздействий, что значительно усложняет анализ и синтез эффективных алгоритмов управления. В этой связи разработка методов исследования и настройки нелинейных систем управления остаётся одной из актуальных проблем теории автоматического управления [2].

Одним из перспективных подходов к анализу нелинейных динамических систем является применение методов линеаризации, позволяющих свести исследование сложных нелинейных моделей к более простым эквивалентным линейным представлениям. Особое место среди них занимает метод обобщённой линеаризации, который обеспечивает аппроксимацию нелинейных характеристик с минимальной квадратичной ошибкой и позволяет учитывать широкий класс переходных процессов, включая апериодические, монотонные и колебательные режимы [1, 2].

Важной задачей при проектировании систем управления является обеспечение заданного качества переходного процесса, которое обычно задаётся в виде желаемой переходной функции. Для решения данной задачи применяются различные методы параметрической оптимизации, среди которых метод мнимых частот занимает особое место благодаря своей эффективности при синтезе систем с заданными динамическими характеристиками [3, 4].

В настоящей работе рассматривается динамический процесс в нелинейной системе, описываемый дифференциальным уравнением с параметрически настраиваемыми коэффициентами. Предлагается подход к определению настроечных параметров регулятора на основе метода обобщённой линеаризации и метода мнимых частот. Разработанная процедура позволяет обеспечить приближённое воспроизведение заданного переходного процесса за счёт минимизации интегральной

квадратичной ошибки между желаемыми и фактическими характеристиками системы.

Методы и решения.

Пусть динамический процесс в нелинейной системе при свободном движений описывается уравнением.

$$D(p,K_j)\cdot x + G(p,K_j)\cdot F(x,px) = 0$$

где $D(p,K_j)$ и $G(p,K_j)-$ полиномы от оператора дифференцирования с вещественными постоянными коэффициентами, $F(x,px)-$ нелинейная функция, K_j- настроечные параметры системы, $j=1,s,x-$ входная координата нелинейного звена.

Предложим, что коэффициенты полиномов $D(p,K_j)$ и $G(p,K_j)$ линейно зависят от настроечных параметров Kj, т.е.

$$D(p,K_j) = D_0(p) + \sum_{j=1}^{S} K_j \cdot D_j(p),$$

$$G(p,K_j) = G_0(p) + \sum_{j=1}^{S} K_j \cdot G_j(p), \quad (1)$$

где D0, Dj, G0, Gj - известные полиномы от P.

Согласно постановке задачи известен желаемый переходный процесс системы $x^0(t)$ и соответствующей ему изображение

$$X^0(p) = \frac{M^0(p)}{N^0(p)} \Leftrightarrow x^0(t),$$

где M0 и N0 - полиномы от P.

Если предполагать, что переходная функция нелинейной системы в общем случае n-го порядка достаточно хорошо аппроксимируется переходной функцией системы второго порядка, то изображение переходной функции (2) будет иметь вид [5]:

$$X^0(p) = A_0 \frac{(\alpha_1/2)+1}{\alpha_0 \cdot p^e + \alpha_1 \cdot p + 1} = x^0(t).$$

Здесь A0 определяет статизм системы, λ_0 и λ_1 - параметры изображения, связанные с временем переходного режима tп и максимальным отклонением в переходном режиме A1 соотношениями.

$$\alpha_0 = \frac{\left[\ln\left((A_1/A_0)-1\right)\right]^2}{\left(9/t_n^2\right)\cdot\left\{\left[\ln\left((A_1/A_0)-1\right)\right]^2+\pi\right\}} \qquad (2)$$

В этом случае переходные процессы по входным координатам нелинейных функции могут быть описаны затухающими составляющими вида

$$x_K(t) = a_k \cdot e^{-p\cdot t}\cdot\cos(\omega\cdot t+\varphi_k), \qquad k=1,r,$$

где $\rho = 3/t_n$ $\qquad \omega = \dfrac{\rho\cdot\pi}{\left[1n\left(A_1/A_0\right)-1\right]}$

a_k и φ_k – амплитуды и фазовые сдвиги.

После обобщенной линеаризации нелинейной функции $F(x, px)$, т.е. замены ее согласно [6, 7] квазилинейным выражением

$F(x, px) = g\cdot x + g\cdot p\cdot x$ получим линеаризованное уравнение системы в виде:

$$\left[D(p,K_j)+(g+g`\cdot p)\cdot G(p,K_j)\right]\cdot x = 0,$$

(3)

где $g = \dfrac{I_{22}\cdot I_1 - I_{12}\cdot I_2}{I_{11}\cdot I_{22}-I_{12}^2}$,

$$g` = \frac{I_{11}\cdot I_2 - I_{21}\cdot I_1}{I_{11}\cdot I_{22}-I_{12}^2} \qquad (4)$$

- коэффициенты обобщенной линеаризации, причем

$$I_{11} = \int_0^T x^2(t)dt \qquad I_{12} = I_{21} = \int_0^T x(t)\cdot x(t)dt \qquad I_{22} = \int_0^T x^2(t)dt \qquad (5)$$

Интегралы I11, I12, I21, I22, зависят лишь от вида и параметров данного процесса x(t) (в частности, его амплитуды, частоты, начальной фазы, коэффициентов затухания и другие.), а также от вида и параметров

нелинейности, благодаря чему уравнения обобщенной линеаризации имеет вид:

$$y(t) = F[x(t), x'(t) \approx y_л(t) = g \cdot x(t) + g' \cdot x'(t)],$$

(6)

так же как и в методе гармонической линеаризации, содержит информацию об основных нелинейных свойствах звена $y = F(x, x')$. В отличие от метода гармонической линеаризации, аппроксимация входной координаты нелинейного звена y(t) функцией ул(t) выполняется здесь с наименьшей квадратичной ошибкой независимо от вида входной координаты. Это обстоятельство дает возможность при использовании обобщенной линеаризации исследовать как колебательные, так и апериодические и монотонные процессы в динамике нелинейной системе.

В частном случае однозначной нелинейности $y = F(x)$ приближенное решение (6) приобретает вид

$$y_л = g \cdot x(t)$$

и в результате минимизации функционалов

$$I = \int_0^T [y(t) - y_л(t)]^2 dt$$

.

Получим

$$g = I' / I'',$$

где $I` = \int_0^T x^2(t) dt$ $I`` = \int_0^T F[x(t)] \cdot x(t) \cdot dt$,

Здесь верхний предел T в дальнейшем принимается равным бесконечности в случае апериодических процессов и кратном полупериоду колебаний в случае затухающих колебательньх процессов.

Далее определив, для желаемого процесса $x^0(t)$ в соответствии с методикой, изложенной выше, значения коэффициентов g и g' по

линеаризованному уравнению (3) с учетом заданных начальных условий x(0), x'(0),..., x(n-1)(0), запишем изображение координаты системы x(t)=X(p), которое будет следующим:

$$X(p,K_j)=\frac{M(p)+\sum_{j=1}^{S}K_J\cdot M_j(p)}{N(p)+\sum_{J=1}^{S}K_j\cdot N_j(p)}\Leftrightarrow x(t)$$

(7)

где M, Mj, N, Nj - известные полиномы от P.

Для получения зависимостей между настроечными параметрами, обеспечиваювщих наилучшее воспроизведение желаемого процесса x0(t), в соответствии с процедурой, изложенной в [5, 8], принимается

$$X(p,K_j)=X^0(p).$$

(8)

Уравнение (8) после постановки в него выражений (2) и (7) производится к виду

$$M^0(p)=\sum_{j=1}^{S}K_j\cdot N_j(p)-N^0(p)\cdot\sum_{j=1}^{S}K_j\cdot M_j(p)=N^0(p)\cdot M(p)\cdot N(p)$$

(9)

По полученному выражению (9) записывается l условных уравнений для l узлов аппроксимации $p=\delta_v$ (δ принимает положительные вещественые значения и рекомендуется располагать их по закону геометрической прогрессии).

$$\delta_v=\delta_0\cdot q^{-v},\qquad v=\overline{0,l-1},$$

со знаменателем прогрессии q, равным двум):

$$K=\Phi_1(\delta_v)+K_2\cdot\Phi_2(\delta_v)+...+K_S\cdot\Phi_S(\delta_v)=\Phi_{S+1}(\delta_v)$$

(10)

где $\Phi_j(\delta_v)=M^0(\delta_v)+....+K_S\cdot\Phi_S(\delta_v)=\Phi_{S+1}(\delta_v),\qquad j=\overline{1,s},$

$\Phi_{S+1}(\delta_v)=N^0(\delta_v)\cdot M(\delta_v)-M^0(\delta_v)\cdot N(\delta_v),\qquad v=\overline{1,l},\quad l>s.$

Здесь подставлены ординаты характеристики мнимых частот $X^0(\delta)$ желаемого процесса.

Далее, каждое условное уравнение (10) умножается на весовые множители $\gamma_v(\delta_v)$, определяемые в соответствии с [5, 8] по формулам

$$\gamma_v(\delta_v)=\theta\cdot\Omega_v^{-1}, \qquad \Omega_v=(s+1)^{-1}\cdot\sum_{j=1}^{S+1}\Phi_j(\delta_v),$$

$$\theta=l^{-1}\cdot\sum_{v=1}^{l}\Omega_v, \qquad v=\overline{1,l}; \qquad j=\overline{1,s+1}$$

(11)

Полученная таким образом система условных уравнений обрабатывается по способу наименьших квадратов относительно двух настроечных параметров, перенесенных в правые части, что дает систему из s-2 нормальных уравнений

$$K_3\cdot D_{j3}+K_4\cdot D_{j4}+....+K_S\cdot D_{jS}=K_2\cdot D_{j1}+D_{j,S+1}$$

(12)

где $$D_{ji}=\sum_{v=1}^{1}\gamma_v^2(\delta_v)\cdot\Phi_i(\delta_v)\cdot\Phi_i(\delta_i), \qquad i=\overline{3,s,}$$

(13)

решая систему (12), получаем s-2 параметров функции параметров K1 и K2:

$$K_j=\Delta_j/\Delta=H_{j1}\cdot K_1+H_{j2}\cdot K_2+H_{j3}, \qquad j=\overline{3,s,}$$

(14)

где $\Delta-$главный определитель системы (12) и Δ_j- его алгебраическое дополнение.

Выводы

Полученнне в результате изложенной процедуры зависимости (13) обеспечивают приближенную минимизацию интегральной квадратичной относительной ошибки между характеристиками мнимых частот $X^0(\delta)$ и

$x(\delta)$; при этом приближенно минимизируется и интегральная квадратичная ошибка воспроизведения желаемого переходного процесса x0(t) фактическим x(t).

Разработана процедура формирования алгоритма управления динамическими объектами на базе метода мнимых частот.

Выведены основные соотношения определения настроечных параметров нелинейного регулятора, на основе применении метода обобщенной линеаризации нелинейной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторого нелинейных динамических систем. Л-М.: Наука, 1965, 208 с.

2. Конавалов А.С., Орурк И.А. Метод обновленной линеаризацией нелинейностей и его применение к синтезу нелинейных систем. Изв вузов. Электромеханика. 1974. № 5 с 505-513.

3. Влакьер О. Анализ нелинейных систем. М.: Мир, 1969, 400 с.

4. Матвеев В.В. Машинный линейных систем при регулярных сигналах. В-КН: системы обработки и передачи информации. Труды ЛИАП, 1972, выа.74, с 210-222

5. Sidikov, I., Khalmatov, D., Alimova, G. Algorithm for the synthesis of a predictive control system for the tape pulling process. E3S Web of Conferences, 2023, 389, 01083. pp.1-8. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901083

6. D.A.Khalmatov, U.O.Khuzhanazarov, G.R.Alimova, J.M.Murodov Adaptive fuzzy control system for multi-dimensional dynamic object under the conditions of uncertainty of Information. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET), Volume 8, Issue 2, February 2021. P. 16606-16612

7. Siddikov, I., Khalmatov, D., Alimova, G., Khujanazarov, U., Sadikova, F., Usanov, M. Investigation of auto-oscilational regimes of the system by dynamic nonlinearities. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2024, 14(1), pp.230–238

8. Isamidin Siddikov, Davronbek Khalmatov, Dilnoza Khushnazarova. Synthesis of synergetic laws of control of nonlinear dynamic plants. E3S Web of Conferences. Volume 452, 06024 (2023). Dnipro, Ukraine, September 5-8, 2023. pp: 1-9. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345206024