УДК 681.513.54+ 621.3

к. т. н., доц. Дрючин В.Г.,
ассистент Ткачев Р.Ю.
(ДонГТУ, г Алчевск, Украина)

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ НА БАЗЕ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ФИЛЬТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В КООРДИНАТАХ СОСТОЯНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Розглядається синтез систем управління нелінійними і лінійними об'єктами з запізнюванням, як у координатах стану, так і в управлінні, при наявності інформації тільки про вихідну координату. Приводяться вираження, що забезпечують розрахунок параметрів регулятору на базі інтегруючих фільтрів за заданими показниками якості.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Практическое применение автоматических регуляторов для различного рода технологических процессов часто затруднено вследствие возникающих при данных процессах запаздываниях. Особенно трудными в управлении являются процессы, в которых запаздывания возникают в координатах состояния, как правило, при охвате объекта управления контуром рециркуляции вещества, по которому выходной сигнал объекта спустя время θ, поступает на его вход. К таким объектам относятся технологические объекты с рециклом, у которых выходной поток или его часть возвращается на вход технологического агрегата [1].

Анализ исследований и публикаций. Исследованию систем управления объектами с запаздыванием в координатах состояния посвящено гораздо большее число работ, чем исследованию систем с объектами, содержащими запаздывание в управлении. Литература, посвященная дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом, по сути содержит изложение результатов, относящихся к объектам с запаздыванием между координатами [2-7]. Среди них особо следует отметить работы [2, 3].

Несмотря на значительное число работ, относящихся к указанной проблеме, задача синтеза оптимальных замкнутых систем управления с запаздыванием в координатах является актуальной и требующей дальнейшего исследования.

Постановка задачи. Излагается алгоритм решения задачи синтеза замкнутых систем управления с запаздыванием в координатах состояния и управлении (т.е. аналитическим путем находится зависимость между управляющими воздействиями, координатами объекта и возмущениями), который базируется на минимизации интегральной квадратичной формы

$$\mathbf{I} = \int_0^\infty \varepsilon^2 \mathbf{dt}, \tag{1}$$

при уравнениях связи, являющихся уравнениями объекта с запаздыванием, представленным в виде уравнения «вход-выход»

$$\begin{gathered}\left[p^n + (\delta_1 + b_1)p^{n-1} + \ldots + (\delta_j + b_j)p^{n-j} + \ldots + (\delta_n + b_n)\right]e^{-p\theta}x_1 = \\ \left[p^m + (\varphi_1 + d_1)p^{m-1} + \ldots + (\varphi_i + d_i)p^{m-i} + \ldots + (\varphi_m + d_m)\right]e^{-p\tau}U,\end{gathered} \tag{2}$$

где x_1– выходная координата объекта;

U – управление объекта;

p=d/dt – оператор дифференцирования;

δ_j и φ_i – нелинейные функции фазовых координат объекта, заданные в аналитическом виде и имеющие непрерывные частные производные соответственно до (n-1)– го и (m-1)– го порядков включительно;

b_j и d_i – постоянные коэффициенты;

θ – время эффекта последействия;

τ – время чистого запаздывания.

Функционал (1) представляет собой интегральный критерий среднеквадратичной ошибки, определяющей близость выходного сигнала замкнутой системы к желаемому (заданному).

Требуемые показатели качества замкнутой системы управления вполне определенно задаются желаемым дифференциальным уравнением (системой уравнений) следующего вида

$$\begin{gathered}\left[p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \ldots + \gamma_k p^{\nu-k} + \ldots + \gamma_\nu\right]x_1 = \\ = \left[\gamma_{\nu-\lambda+1}p^{\lambda-1} + \ldots + \gamma_{\nu-1}p + \gamma_\nu\right]e^{-p\tau}x_з,\end{gathered} \tag{3}$$

где $x_з$ – задающее воздействие системы;

ν и λ – порядок и астатизм синтезируемой системы, соответственно;

γ_k – коэффициенты, задающие распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы.

Задача управления в этом случае будет сводиться к определению такого закона регулирования в дифференциальной форме

$$R_1(p,\tau,\theta,x)\varepsilon = R_2(p,\tau,\theta,x)U, \tag{4}$$

который присоединенный к объекту управления (2) гарантировал бы минимальное значение функционалу (1).

В выражении (4) $R_1(p,\tau,\theta,x)$ и $R_2(p,\tau,\theta,x)$ – многочлены некоторых степеней оператора дифференцирования с нелинейными коэффициентами, зависящими от фазовых координат объекта и времени запаздывания θ и τ.

Изложение материала и его результаты. Замкнутая система (2), (4) описывается дифференциальным соотношением вида

$$\begin{aligned}&\Big\{\Big[p^n+(\delta_1+b_1)p^{n-1}+\ldots+(\delta_j+b_j)p^{n-j}+\ldots+(\delta_n+b_n)\Big]\cdot e^{-p\theta}R_2(p,\tau,x)+\\&+\Big[p^m+(\varphi_1+d_1)p^{m-1}+\ldots+(\varphi_i+d_i)p^{m-i}+\ldots+(\varphi_m+d_m)\Big]\cdot e^{-p\tau}R_1(p,\tau,x)\Big\}x_1=\\&\Big[p^m+(\varphi_1+d_1)p^{m-1}+\ldots+(\varphi_i+d_i)p^{m-i}+\ldots+(\varphi_m+d_m)\Big]\cdot e^{-p\tau}R_1(p,\tau,x)x_з\end{aligned} \tag{5}$$

Сравнивая (3) и (5) и выполнив математические преобразования, получим

$$\begin{aligned}&R_1(p,\tau,x)=\Big[p^n+(\delta_1+b_1)p^{n-1}+\ldots+(\delta_j+b_j)p^{n-j}+\ldots+(\delta_n+b_n)\Big]\cdot\\&\cdot\Big[\gamma_{\nu-\lambda+1}p^{\lambda-1}+\ldots+\gamma_{\nu-1}p+\gamma_\nu\Big]\cdot e^{-p\theta};\\&R_2(p,\tau,x)=\Big\{\Big[p^\nu+\gamma_1p^{\nu-1}+\ldots+\gamma_kp^{\nu-k}+\ldots+\gamma_\nu\Big]-\\&-\Big[\gamma_{\nu-\lambda+1}p^{\lambda-1}+\ldots+\gamma_{\nu-1}p+\gamma_\nu\Big]\cdot e^{-p\tau}\Big\}\times\\&\times\Big[p^m+(\varphi_1+d_1)p^{m-1}+\ldots+(\varphi_i+d_i)p^{m-i}+\ldots+(\varphi_m+d_m)\Big].\end{aligned} \tag{6}$$

Анализируя (6) можно отметить, что регулятор (4) будет реализуем физически, если

$$m+\nu\ge n+\lambda-1. \tag{7}$$

Таким образом, выражения (7) накладывает ограничение на реализацию регулятора, который обеспечивал бы заданные показатели качества при требуемом астатизме системы управления объектом с запаздыванием, описываемый выражением (2).

Расчет регулятора выполним следующим образом. Преобразуем выражения (6) и подставим в (4). В результате математических преобразований получим

$$
\begin{aligned}
&\left[M_0 p^{n+\lambda-1} + \left(M_1 + L_1 e^{-p\theta}\right) p^{n+\lambda-2} + \ldots + \left(M_{n+\lambda-1} + L_{n+\lambda-1} e^{-p\theta}\right)\right]\left(x_з - x_1\right) = \\
&= \left[p^{m+\nu} + N_1 p^{m+\nu-1} + \ldots + \left(N_{m+\lambda-2} - K_{m+\lambda-2} e^{-p\tau}\right) \cdot \right. \\
&\left. \cdot p^{m+\lambda-2} + \ldots + \left(N_{m+\nu} - K_{m+\nu} e^{-p\tau}\right)\right] U,
\end{aligned}
\tag{8}
$$

где – M_i, N_i, K_i, L_i нелинейные коэффициенты, зависящие от коэффициентов выражения (6).

Регулятор (8) возможно реализовать на базе интегрирующего фильтра

$$
\begin{aligned}
&\dot{y}_i = y_{i+1},\ i = 1, 2, \ldots, m + \nu + r - 1 \\
&\dot{y}_{m+\nu+r} = U^*,
\end{aligned}
\tag{9}
$$

где $U^* = \left(x_з - z\right) - \left(N_{m+\nu} - K_{m+\nu} e^{-p\tau}\right) y_1 - \ldots$

$- \left(N_{m+\nu-2} - K_{m+\nu-2} e^{-p\tau}\right) y_{m+\lambda-1} - \ldots - N_1 y_{m+\nu}$.

В этом случае фазовые координаты фильтра (9) позволяют сформировать управление

$$
\begin{aligned}
U = &\left(M_{n+\lambda-1} + L_{n+\lambda-1} e^{-p\theta}\right) y_1 + \left(M_{n+\lambda-2} + L_{n+\lambda-2} e^{-p\theta}\right) y_2 + \\
&\ldots + \left(M_1 + L_1 e^{-p\theta}\right) y_{n+\lambda-1} + M_0 y_{n+\lambda}
\end{aligned}
\tag{10}
$$

Учитывая то, что выходная координата регулятора y_1 и выходная координата объекта x_1 при управлении (10) связаны соотношением

$$
x_1 = \left[\gamma_{\nu-\lambda+1} p^{\lambda-1} + \ldots + \gamma_{\nu-1} p + \gamma_\nu\right] e^{-p\tau} y_1, \tag{11}
$$

и можно выходную координату объекта использовать при формировании управления U* интегрирующего фильтра (9). Таким образом

$$U^{*}=\left(x_{з}-z\right)-N_{m+\nu}y_{1}-\ldots-N_{m+\nu-2}y_{m+\lambda-1}-\ldots$$
$$-N_{1}y_{m+\nu}+\left[p^{m}+\left(\varphi_{1}+d_{1}\right)p^{m-1}+\ldots+\left(\varphi_{m}+d_{m}\right)\right]x_{1}\ . \qquad (12)$$

Это устраняет необходимость в моделировании запаздывания при построении регулятора. Однако, при отработке возмущающих воздействий, действующих на объект, система остается разомкнутой по возмущению при сохранении требуемых качественных показателей по заданию. Для устранения этого, составляющие управления (12) одинакового порядка (при замене x_1, в соответствии с (11)) необходимо пропустить через фильтр "высоких частот", имеющий передаточную функцию вида

$$W_{ф}\left(p\right)=\frac{T_{ф}p}{T_{ф}p+1}.$$

Выводы и направления дальнейших исследований.

Изложенный выше метод синтеза систем управления с запаздыванием позволяет обеспечить требуемые показатели качества регулирования, как по заданию, так и по возмущению. Рассмотренное построение регуляторов обеспечивает их однотипность в смысле реализуемости на базе интегрирующих фильтров, как для линейных, так и для нелинейных объектов с запаздыванием. Синтезированный регулятор при управлении нелинейным объектом одновременно с компенсацией влияния запаздывания на устойчивость системы осуществляет компенсационную линеаризацию объекта. Обеспечение качественных показателей при отработке возмущений, действующих на объект, осуществляется путем введения в закон управления фильтра высокой частоты. Кроме того, рассмотренный метод синтеза характеризуется универсальностью, так как его можно применять при построении систем управления объектами линейными и нелинейными, с запаздыванием и без запаздывания.

Рассматривается синтез систем управления нелинейными и линейными объектами с запаздыванием, как в координатах состояния, так и в управлении, при наличии информации только о выходной координате. Приводятся выражения, обеспечивающие расчет параметров регулятора на базе интегрирующих фильтров по заданным показателям качества.

The synthesis of control systems of nonlinear and linear objects with delay, both in coordinates of a condition, and in management is considered, at presence of the information only about target coordinate. The expressions ensuring account of parameters of a regulator on the basis of integrating filters on given parameters of quality are resulted.

Библиографический список.

1. *Мазуров В.М., Малов Д.И., Саломыков В.И. Система автоматического регулирования величины pH в абсорбционной колонне с рециклом.// Химическая промышленность, №4, 1974.*
2. *Красовский Н.Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968.*
3. *Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. М.: Наука, 1972.*
4. *Габасов Р., Кирилова Ф.М. Качественная теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1971*
5. *Солодов А.В., Солодова Е.А. Системы с переменным запаздыванием. –М.: Наука, 1980.*
6. *Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, 1978.*
7. *Кіку А.Г., Білоус Т.І. Квазіоптимальні регулятори для об'єктів з чистим запізнюванням. // Праці міжнародної конференції з управління "Автоматика 2000" – Львів: 2000. Том 2, С.115–120.*

Рекомендовано к печати
к. т. н., проф. Паэрандом Ю.Э.