

УДК 681.516.73(045)

Р. Ю. Ткачев

## ТРАНСПОРТНОЕ ЗАПАЗДЫВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: [iesy@nau.edu.ua](mailto:iesy@nau.edu.ua)

*Приведены различные аспекты определения времени транспортного запаздывания посредством измерения дополнительных параметров процесса, позволяющих произвести его оценку. Показана возможность использования этой оценки при синтезе адаптивной системы управления для объекта с переменным запаздыванием.*

**Ключевые слова:** время транспортного запаздывания, адаптивная система, объект с переменным запаздыванием.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Большинство промышленных объектов с транспортным запаздыванием, обусловленных необходимостью передачи вещества, энергии или сигнала на расстояние. Такие объекты имеются в авиации, космической, химической, нефтяной, металлургической промышленности и других отраслях. При построении систем автоматического управления процессом, которому свойственно транспортное запаздывание, оно становится главным фактором определяющим структуру системы управления, поскольку оказывает существенное влияние на устойчивость и качество переходных процессов в замкнутой системе.

В последнее время интерес большинства исследователей концентрируется вокруг проблем, связанных с управлением системами с запаздыванием в управлении. Об этом свидетельствует большой спектр работ, посвященных данной проблематике.

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время основное внимание уделяется адаптивным и оптимальным системам управления [1 – 4]. Такие системы существенно улучшают качество управления объектом с запаздыванием, однако требуют значительных математических вычислений и предварительных оценок действующих возмущений. Адаптивный регулятор удовлетворительно работает при значительных отклонениях системы, однако не позволяет уменьшить время переходных процессов при существенном запаздывании, так как с увеличением коэффициентов управления нарушается устойчивость системы [3].

Уникальным подходом компенсации «вредного» влияния запаздывания можно считать идею, реализованную в предикторе Смита и регуляторе Ресвика [5; 6]. Она заключается в синтезе системы управления, в которой запаздывающее управляющее воздействие не влияет на устойчивость и качество переходных процессов для непрерывных объектов с известными параметрами и временем запаздывания. Стоит отметить, что использование предиктора Смита для решения задач управления объектами с запаздывающим входным сигналом нашло широкое применение. Однако некоторые исследователи считают, что существенным недостатком системы с предиктором Смита или регулятором Ресвика является сильная чувствительность к малым вариациям времени запаздывания объекта, т.е. система устойчива только при точном равенстве запаздывания объекта и запаздывания модели [7 – 9].

Большинство проектировщиков адаптивных систем уделяют особое внимание «математической» стороне синтеза, забывая при этом физическую или физико-механическую сущность некоторых явлений, т. е., чтобы построить систему управления технологическим процессом необходимо, прежде всего, познать этот процесс.

**Постановка задачи.** Исследование транспортного запаздывания технологических процессов и выявление возможности оценки его значения через доступные измерению или оцениванию дополнительные параметры процесса.

**Изложение материала и его результаты.** Вспомним определение запаздывания, которое называется транспортным, если в технологическом процессе вещество или энергия перемещаются с определенной скоростью из одной точки в другую без какого-либо изменения его свойств и характеристик. Таким образом, транспортное запаздывание является одним из немногих параметров процесса имеющего физическую интерпретацию, и может изменяться в зависимости от характеризующих его параметров

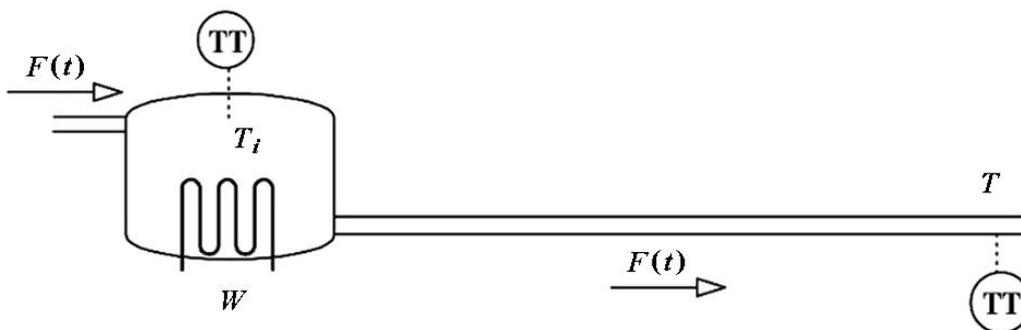
$$\tau = \frac{L(t, x, y, z)}{v(t)}, \quad (1)$$

где  $L(t, x, y, z)$  – траектория перемещения вещества или энергии между точкой измерения и точкой ввода управляющего воздействия;  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $v(t)$  – скорость перемещения вещества или энергии.

В качестве примера можно привести систему «земля–космический корабль». Управляющий сигнал  $U(t)$ , выданный координационно-вычислительным центром, поступает в аппаратуру космического корабля через некоторое время  $\tau(t)$ , определяемое расстоянием  $L(t)$  от координационно-вычислительного центра до спутника и скоростью распространения с радиоволн.

Другим примером является стан холодной прокатки металла. Датчик толщины листа по конструктивным соображениям не может находиться непосредственно под валками, а только на некотором удалении от оси валков. Если лист движется с постоянной скоростью и никаких изменений толщины в промежутке между валками и толщиномером не происходит, то толщина листа в месте расположения толщиномера изменяется во времени как  $h(t - \tau)$ , если  $h(t)$  – толщина при выходе из валков. Скорость транспортирования меняется в широких пределах, а, следовательно, и запаздывание. Поэтому для обеспечения высокой производительности в условиях жестких требований к точности регулирования обуславливают необходимость введения дополнительного датчика скорости.

Систему нагрева воды, изображенную на рисунке, также можно считать объектом с запаздыванием. Вода нагревается в корпусе аппарата с помощью электрического нагревательного элемента (ТЭНа), а ее расход изменяется насосом вдоль теплоизолированного трубопровода к выходу системы. Вход управления – электрическая энергия  $W$  нагревателя, а выход объекта – температура  $T$  в конце трубопровода. Линейная модель процесса может быть получена с помощью простой процедуры идентификации близко к рабочей точке  $W_0, T_0$ . Когда увеличивается количество энергии  $W$ , температура в нагревателе также увеличивается.



Нагревательный аппарат с длинным трубопроводом

Поскольку трубопровод заполнен водой с начальной температурой  $T_0$ , то любое изменение температуры, измеряемой датчиком ТТ на выходе, воспринимается не сразу, и

необходимо ожидать, пока горячая вода не достигнет конца трубопровода прежде, чем датчик почувствует это изменение. Таким образом, после запаздывания, определяемого расходом жидкости и длиной трубопровода, выходная температура  $T$  начинает повышаться с той же самой динамикой как температура в корпусе.

Запаздывание  $\tau$  может быть вычислено с использованием значений расхода  $F$  и объема канала  $V$  как

$$\tau = \frac{V}{F}. \quad (2)$$

Такой формулой можно воспользоваться при проектировании системы управления, в которых регулируемой величиной являются расход жидкости или газа.

Таким образом, транспортное запаздывание зависит от нагрузки объекта. Чем больше нагрузка, тем меньше запаздывание, поскольку при большой нагрузке скорость движения среды выше.

В случае невозможности непосредственного измерения управляющего параметра можно произвести его оценку по измеряемым параметрам. Например, в коксохимическом производстве при управлении процессом нагрева в трубчатой печи поглотительного масла насыщенного бензолом для его дистилляции достаточно сложно измерить расход поглотительного масла традиционными методами. Поэтому, измеряя другие параметры процесса, можно вычислить косвенное значение необходимого параметра. Так, в предположении установившегося течения вязкой жидкости на основании закона Пуазейля–Гагена расход определяется выражением

$$F = \frac{\pi R}{8\mu L} \Delta p, \quad (3)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления поглотительного масла на входе и выходе трубчатой печи, Па;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости масла, Па·с;  $R$  – радиус трубопровода, м;  $L$  – длина трубопровода, м.

Подставляя выражение (3) в уравнение (2) и учитывая, что объем трубопровода  $V = \pi R^2 L$ , получим

$$\tau = \frac{8\mu}{\Delta p} \left( \frac{L}{R} \right)^2. \quad (4)$$

Используя для оценки запаздывания два датчика давления поглотительного масла на входе и выходе трубчатой печи и один датчик температуры по выражению (4), можно сформировать виртуальный (программный) датчик, причем коэффициент динамической вязкости может быть получен табулированием как функция температуры и давления.

Возможен также и другой подход к определению запаздывания, для чего перейдем к интегральной форме записи выражений (1) и (2). Предположим, что при изменении расхода потока, а следовательно и его средней скорости, для определения времени запаздывания на расстояние  $x$  заполненного жидкостью трубопровода в определенный период времени  $t_x$  получим

$$x = \int_0^{t_x} v(t) dt, \quad (5)$$

где  $v(t)$  – скорость движения вдоль трубопровода элементарного объема жидкости длиной  $dL$ ;  $t_x$  – время, за которое элементарный объем переместится от одного конца трубопровода к другому, т. е. время запаздывания.

Таким образом, значение времени местонахождения представляет собой верхний предел в интеграле (5), чтобы вычислить длину канала

$$L = \int_0^{t_x} v(t) dt, \quad (6)$$

в результате решения которого будет получено значение запаздывания  $\tau = t_r$ .

Когда расход измеряется в режиме реального времени, уравнение (6) может использоваться для оценки  $\tau$ . Поскольку все современные системы управления в настоящее время реализуются на микропроцессорной технике, то целесообразна реализация этого выражения в дискретном виде.

Предположим, что изменение расхода оценивается в каждый момент времени выборки  $T_s$ , которое выбирается как

$$f(t) \cong f(kT_s), \quad t \in [kT_s, (k+1)T_s].$$

Тогда, транспортное запаздывание объекта (системы) приближенно может быть оценено как целочисленное значение многократной  $n$  выборки во времени. В каждый момент выборки  $kT_s$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ) расстояние  $dx_k$ , которое может быть заполнено жидкостью за время одной выборки ( $T_s$ ) с соответствующим расходом  $f(kT_s)$ , определяется выражением

$$dx_k = \frac{T_s f(kT_s)}{S}.$$

Используя дискретное время приближенного уравнения (5), которое учитывает различные значения расхода во время различных интервалов выборки, значение  $n$  может быть вычислено при каждой выборке следующим образом

$$L = \int_{t-t_r}^t v(t) dt = \frac{1}{S} \int_{t-t_r}^t f(t) dt \cong \frac{T_s}{S} \sum_{i=0}^{i=n} f[(k-i)T_s]. \quad (7)$$

Отметим, что вычисления  $L$  в уравнении (7) можно сделать, добавляя обратную последовательность расходов, пока уравнение (7) его не содержит. По существу это означает проверку полностью заполненного жидкостью трубопровода до требуемого давления. Таким образом, запаздывание процесса может быть оценено следующим отношением

$$\tau = nT_s. \quad (8)$$

При таком вычислении может быть заложена систематическая ошибка  $T_s/2$  [10]. Если выбрать шаг выборки достаточно малым так, что  $n \gg 1$ , тогда этой ошибкой можно пренебречь. Этот алгоритм оценки запаздывания довольно удобен, поскольку: 1) цифровая реализация оценочной функции запаздывания в уравнениях ((7) – (8)) очень проста и не нуждается ни в каком настраиваемом параметре; 2) для оценки времени запаздывания достаточно знать значения  $L$  и  $S$ . Эта же самая идея может использоваться и в других случаях, где доступный измерению сигнал дает информацию о запаздывании процесса.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Приведенные алгоритмы могут не только использоваться в целях идентификации параметров модели объекта, но также и в структуре адаптивного управления. Например, в регуляторе с предиктором Смита модель запаздывания, используемая в прогнозирующем устройстве, может быть скорректирована во время работы регулятора.

## Список литературы

1. Као Тиен Гуинь. Адаптивное управление объектом с запаздыванием на основе беспоисковой самонастраивающейся системы с моделью / Као Тиен Гуинь, Нгуен Ми, Рауль Ривас Перес // *АиТ*. – 1988. – №12. – С. 106–115.
2. Паршева Е. А. Адаптивное децентрализованное управление многосвязными объектами / Е. А. Паршева, А. М. Цыкунов // *Автоматика и телемеханика*. – 2001. – № 2. – С. 135–148.
3. Ульшин В. А. Адаптивное управление технологическими процессами: монография / В. А. Ульшин, Д. А. Зубов – Луганск: СНУ, 2002. – 210 с.
4. Mirkin L. On the extraction of dead-time controllers from delay-free parametrizations / L. Mirkin. In Proc. of 2nd IFAC Workshop on Linear Time Delay Systems, Ancona, Italy, 2000. – P. 157–162.
5. Смит Отто Дж. М. Автоматическое регулирование / Отто. Дж. М. Смит // пер. с англ. под ред. Попова Е. П. – М.: Физматгиз, 1963. – 847 с.
6. Ресвик Дж. В. Труды I Международного конгресса по автоматическому управлению ИФАК. Теория непрерывных систем / Дж. В. Ресвик. – М.: АН СССР, 1961. – С. 95–111.
7. Лукас. Теория автоматического управления / Лукас. – 2-е изд., перераб. и допол. – М.: Недра, 1990, – 416 с.
8. Савин М. М. Исследование динамических характеристик некоторых систем автоматического регулирования содержащих объекты с чистым запаздыванием / М. М. Савин // *Электромеханика*. – № 6. – 1972. – 665 с.
9. Ткачев Р. Ю. О практической реализации регулятора Ресвика / Р. Ю. Ткачев // Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. «Авіа–2006». – К.: НАУ, 2006. – С. 22.65–22.69.
10. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / Ж. Макс. – в 2-х т. // пер. с франц. – М.: Мир, 1983. Т. 1. – 312 с.

Р. Ю. Ткачов

**Транспортне запізнення технологічних процесів як об'єкт досліджень**

Наведено різні аспекти визначення часу транспортного запізнювання за допомогою вимірювання додаткових параметрів процесу, що дозволяють виконати його оцінку. Показано можливість використання цієї оцінки під час синтезу адаптивної системи управління для об'єкта зі змінним запізнюванням.

R. Ju. Tkachov

**Transport delay of technological processes as the object of research**

Different aspects over of determination of time of a transport delay are brought, by means of measuring of additional parameters of process, allowing to produce his estimation. Possibility of the use of this estimation is shown at the synthesis of adaptive control system for an object with a variable delay.