
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

УДК 621.3.049.77
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1011-1022

**ЦИФРОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ
В СИСТЕМАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

М. А. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. ПРИЛУЦКИЙ², О. В. ПРОКОФЬЕВ³,
С. В. ТАЛЕНФЕЛЬД⁴, В. А. ШУБАРЕВ⁴

¹ *Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота Военно-морская академия
им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, Россия*
**bel.mih@bk.ru*

² *НГ-Энерго, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт компьютерных наук и технологий/Высшая школа программной инженерии,
Санкт-Петербург, Россия*

⁴ *Авангард, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Предложен подход к моделированию систем автоматического управления с переменным запаздыванием с помощью регистра сдвига. Проанализированы виды переменного запаздывания. Рассматривается комбинированное переменное запаздывание, возникающее вследствие переменной скорости и переменной длины тракта передачи сигналов. Предлагается алгоритм моделирования такого запаздывания с учетом начальной функции на основе регистра сдвига. Алгоритм реализован на языке C++ и может быть адаптирован к коду микроконтроллера или блока среды моделирования (например, MatLab/Simulink).

Ключевые слова: системы автоматического управления с переменным запаздыванием, имитационное моделирование, регистр сдвига

Ссылка для цитирования: Беляев М. А., Прилуцкий А. В., Прокофьев О. В., Таленфельд С. В., Шубарев В. А. Цифровая реализация переменного запаздывания в системах моделирования и управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 1011—1022. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1011-1022.

**DIGITAL IMPLEMENTATION OF VARIABLE DELAY
IN MODELING AND CONTROL SYSTEMS**

M. A. Beliaev^{1*}, A. V. Prilutsky², O. V. Prokofev³,
S. V. Talenfeld⁴, V. A. Shubarev⁴

¹ *Military Educational and Scientific Center of the Navy Naval Academy Named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, St. Petersburg, Russia*
**bel.mih@bk.ru*

² *NG-Energo, St. Petersburg, Russia*

³ *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Computer Science and Technology / Higher School of Software Engineering, St. Petersburg, Russia*

⁴ *Avangard, St. Petersburg, Russia*

Abstract. An approach to modeling automatic control systems with variable delay using a shift register is proposed. The types of variable delay are analyzed. The combined variable delay arising due to the variable speed and variable length of the signal transmission path is considered. An algorithm for modeling such a delay is proposed taking into

account the initial function based on a shift register. The algorithm is implemented in C++ and can be adapted to the code of a microcontroller or a simulation environment block (for example, Matlab/Simulink).

Keywords: automatic control systems with variable delay, simulation, shift register

For citation: Belyaev M. A., Prilutsky A. V., Prokofev O. V., Talenfeld S. V., Shubarev V. A. Digital implementation of variable delay in modeling and control systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 12. P. 1011—1022 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1011-1022.

Введение. Особенности аналитических исследований линейных нестационарных систем с переменным запаздыванием. Исследование систем автоматического управления (САУ) с большим запаздыванием относительно доминирующих постоянных времени объекта является достаточно сложной задачей, поскольку запаздывание вносит большой фазовый сдвиг в прямой цепи управления и при прочих равных ухудшает условия устойчивости системы.

Линейные стационарные системы с запаздыванием по своей физической сути являются системами с распределенными параметрами [1]. Например, простейшая САУ с запаздыванием τ (рис. 1) описывается характеристическим уравнением:

$$1 + ke^{-s\tau} = 0, \quad (1)$$

имеющим бесконечное множество корней (k — коэффициент усиления). В связи с этим анализ и синтез стационарных линейных САУ с запаздыванием наиболее известными аналитическими методами линейной теории практически невозможны.

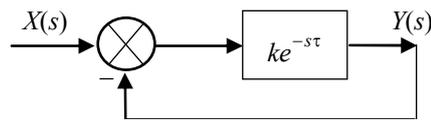


Рис. 1

Исключения составляют только частотные методы, которые достаточно подробно представлены в учебниках по теории автоматического управления. Что касается линейных нестационарных САУ с запаздыванием, тем более нелинейных, то аналитические исследования возможны только для ограниченного класса таких систем (или соответствующих уравнений) [2—5]. В связи с этим системы с переменным запаздыванием остаются слабоизученной областью. Переменные запаздывания представлены либо априори неопределенными нестационарными моделями, либо постоянной величиной [6]. Однако САУ, в которых скорость изменения запаздывания может быть соизмерима со скоростью изменения координат в этих системах управления, особенно при компенсации основных возмущающих воздействий, следует считать системами с переменным запаздыванием или, в общем случае, с переменными параметрами (т.е. нестационарными). С этой точки зрения звено переменного запаздывания присутствует во многих системах управления. Например, во всех энергетических установках (ЭУ) перенос теплоносителя (особенно газообразного) по трубопроводам происходит с переменной скоростью (ядерные ЭУ, газотурбинные и паросиловые ЭУ) [6—8].

Среди менее известных систем следует отметить дизель-электрические установки (ДЭУ), работающие по замкнутому (ЗЦ) или полужамкнутому циклу, где применяются искусственные газовые смеси и газоанализаторы [9]. Время запаздывания в перечисленных системах часто считают постоянным, хотя, очевидно, что скорость теплоносителя или искусственной газовой смеси зависит от температуры и давления в трубопроводах (эти же параметры могут влиять на запаздывание в газоанализаторах). В принципе, переменное запаздывание характерно для датчиков мощности ядерных реакторов [10], цифровых и цифровых двухуровневых информационных систем [11], акустических и телекоммуникационных систем [12, 13]. Однако наиболее показательными объектами с переменным запаздыванием, в которых изменяются скорость и длина передающего тракта, являются достаточно длинные ленточные конвейеры (транспортеры) [14].

Отметим особенности исследования линейных нестационарных систем (ЛНС) с переменным запаздыванием:

1) основным отличием структурных преобразований для ЛНС, по сравнению со стационарными системами, является невозможность перестановок последовательно включенных звеньев [15]. Поэтому не всегда возможно заменить все линии передачи одним звеном запаздывания. Также это обстоятельство важно учитывать при использовании регуляторов с компенсацией запаздывания (регулятор Смита и т.п.) [6, 16];

2) часто для исследования систем с переменными параметрами используют метод „замороженных коэффициентов“. В общем случае этот метод неприменим [2];

3) для исследования устойчивости ЛНС с запаздыванием наиболее эффективны метод функционалов Ляпунова—Красовского или метод функций Ляпунова—Разумихина [3, 17]. Несмотря на универсальность упомянутых методов, подбор необходимых для доказательства устойчивости функций или функционалов часто носит полуэмпирический характер (и дает, как правило, только достаточные условия устойчивости);

4) применение рядов Паде для аппроксимации переменного запаздывания (или более сложных комбинированных аппроксимаций), хотя и может привести в некоторых довольно простых случаях (система на рис. 1 с переменным запаздыванием $\tau = t$ [18]) к качественно неверным результатам, тем не менее используется для исследования даже сложных нелинейных систем с переменным запаздыванием [5]. Однако выбор порядка аппроксимации часто не имеет строгого обоснования;

5) при достаточно медленном изменении запаздывания в известном диапазоне (или быстро, но по точно известному закону) широко используются методы робастного и адаптивного управления [4, 7, 8, 19]. Однако эти методы, как правило, используют модель объекта управления с запаздыванием в регуляторе (в явном или неявном виде или, как минимум, выполнения определенных условий [19]) и всегда требуют очень точной математической постановки задачи, что часто ограничивает их применение на практике.

Таким образом, можно утверждать, что результаты практически всех аналитических исследований линейных нестационарных САУ с запаздыванием проверяются моделированием и, видимо, во многих случаях моделирование остается единственным возможным инструментом для оценки устойчивости этих систем, а тем более — для исследования основных показателей качества процесса управления (время переходного процесса, колебательность и т.п.). Использование регуляторов с моделью объекта управления (робастных компенсаторов, адаптивных и т.п.) часто требует реализации переменного запаздывания в реальном времени.

Моделирование систем с переменным запаздыванием. Применяемые численные методы для динамических систем с запаздыванием имеют свои особенности [20]:

1) учет начальной функции;

2) использование метода шагов (промежуток времени, равный запаздыванию) и связанного с ним появления разрывов решения;

3) запаздывание увеличивает порядок разностного уравнения, которое используется для моделирования непрерывной системы.

Запаздывание, используемое в математических моделях, можно разделить на реальное и аппроксимационное. Учитывается природа реального запаздывания, т.е. передачи потока вещества, энергии, информации с конечной скоростью на конечное расстояние. В общем случае при передаче такого несжимаемого потока с переменной скоростью $v(t)$ на переменное расстояние $l(t)$ (рис. 2) запаздывание $\tau(t)$ входного сигнала $y(t)$ удовлетворяет соотношению:

$$l(t) = \int_{t-\tau(t)}^t v(\lambda) d\lambda, \quad v(t) > 0, l(t) > 0, \quad (2)$$

λ — переменная интегрирования.

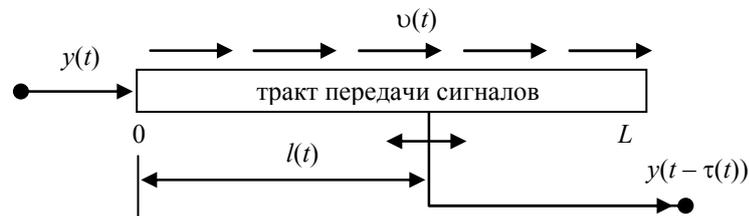


Рис. 2

Переменная $y(t)$ является некоторой информационной характеристикой, связанной с распространением потока. До начала функционирования тракт передачи должен содержать начальную информацию $y_H(x)$ по всей его длине, т.е. предысторию. Моделировать запаздывание такого рода возможно на основе математической модели в виде дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} + v(t) \cdot \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями

$$U(x, t)|_{t=0} = y_H(x), \quad x \in [0; L];$$

$$U(x, t)|_{x=0} = y(t), \quad t \in [0; t_{\max}],$$

причем

$$y(t - \tau(t)) = U(l(t), t).$$

В этом случае учитываются $v(t)$, $l(t)$, входной сигнал $y(t)$ и предыстория $y_H(x)$. Запаздывание $\tau(t)$ получается неявным образом.

Однако такой путь труден для моделирования динамических систем с переменным запаздыванием в общем случае. Более удобным будет использование программных систем, в которых модель формируют из различных динамических и статических блоков с необходимыми связями. Например, блок переменного запаздывания (БПЗ) в среде Simulink может работать в двух режимах. Так, в режиме реализации „переменного временного запаздывания“ (в нашей трактовке — скорость постоянная, длина переменная) по заданным $\tau(t)$ и $y(t)$ формируется выходной сигнал $y(t - \tau(t))$. Если эффект переменного запаздывания вызван переменной длиной $l(t)$ тракта передачи при постоянной скорости v_0 , то:

$$\tau(t) = \frac{l(t)}{v_0}. \quad (4)$$

В режиме реализации „переменного транспортного запаздывания“ (в нашей трактовке — скорость переменная, длина постоянная) по заданным переменной скорости $v(t)$ и постоянной длине l_0 по входному сигналу $y(t)$ формируется $y(t - \tau(t))$, где $\tau(t)$ удовлетворяет соотношению:

$$\int_{t-\tau(t)}^t v(\lambda) d\lambda = l_0. \quad (5)$$

В работе [21] представлен способ моделирования комбинированного запаздывания (где и длина, и скорость будут переменными) на базе имеющихся блоков переменного запаздывания, с учетом возможности задания произвольной начальной функции (не равной константе). Причем в случае переменного транспортного запаздывания такая процедура может быть достаточно сложной (а иногда даже нерешаемой) задачей. Однако этих проблем можно избежать, если использовать регистр сдвига, работающий по определенному алгоритму.

Алгоритм работы регистра сдвига реализован в виде модуля для MatLab/Simulink с использованием S-функций (это функции обратного вызова для кода на языке C++). Алгоритм может быть адаптирован к коду микроконтроллера.

Модель запаздывания, которая состоит из комбинации переменного („чистого“ временного запаздывания $\tau(t)$) и транспортного запаздывания (связанного с изменением скорости потока $v(t)$), в общем виде можно описать, используя модель конвейера (рис. 3). Входы блока: $y(t)$ — входной сигнал, $l(t)$ — длина конвейера, $v(t)$ — скорость ленты. Выход блока $y(t - \tau(t))$ — входной сигнал с запаздыванием, $\tau(t)$ — комбинированное запаздывание, $y_{cp}(t)$ — среднее значение $y(t)$ на ленте конвейера.

Запаздывание $\tau(t)$ находим из решения уравнения:

$$l(t) = \int_{t-\tau(t)}^t v(\lambda) d\lambda = L(\lambda) \Big|_{t-\tau(t)}^t = L(t) - L(t - \tau(t)), \tag{6}$$

$$L(t - \tau(t)) = L(t) - l(t). \tag{7}$$

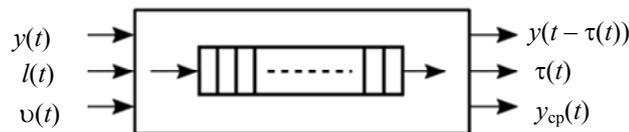


Рис. 3

Общая схема работы блока следующая. Запись информации производится дискретно (точная информация известна в точках t_k). Обозначим:

$$t_k^* = t_k - \tau(t_k). \tag{8}$$

Так как $L(t)$ (интеграл от скорости) — функция неубывающая, то обратная функция $t(L)$ однозначно определена для своего аргумента, поэтому для нахождения величины t^* можно использовать интерполяцию (например, полиномиальную или дробно-рациональную). Для нахождения чистого запаздывания $\tau(t)$ используем (8). Аналогичным образом, используя обратную функцию $y(L)$, можно найти величину y^* (рис. 4).

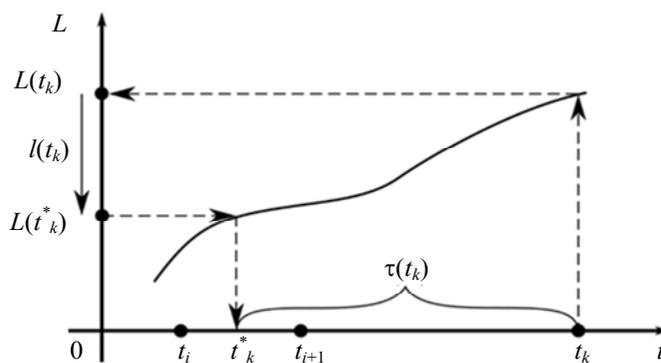


Рис. 4

Функционально схема блока запаздывания представляет собой кольцевой регистр (рис. 5). В массив ячеек на каждом шаге записываются новые y_k, t_k, L_k . Далее находим пройденный путь, соответствующий текущему запаздыванию $L_k^* = L_k - l_k$. Поскольку значение пройденного пути L_k^* принадлежит отрезку между узлами, то для вычисления обратных функций t_k^* и y_k^* , где L_k^* — аргумент, используется интерполяция по четырем ближайшим узлам (два слева и два справа).

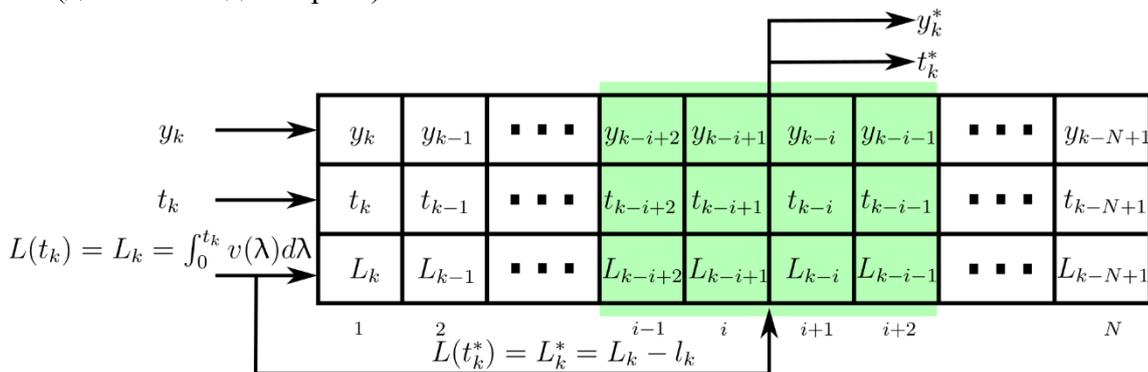


Рис. 5

Алгоритм работы модели запаздывания на основе регистра позволяет:

1) записывать значения $y(t), L(t)$, где $L(t)$ — весь путь потока, который может быть

найден по формуле $L(t) = \int_0^t v(\lambda) d\lambda$;

2) находить точку съема информации, которая соответствует текущему значению $l(t)$, по формуле $L(t - \tau(t)) = L(t) - l(t)$;

3) получить выходные величины $y(t - \tau(t))$ и $\tau(t)$;

4) для повышения точности $L(t)$, как непрерывная функция времени, может быть получена путем интерполяции (с использованием, например, полинома Лагранжа) по своим значениям в нескольких выбранных точках;

5) интерполяция дает возможность использовать регистр для решения дифференциальных уравнений любым известным численным методом с переменным шагом интегрирования;

6) моделировать нелинейное запаздывание, если его величина $\tau(t)$ зависит от функции $y(t)$, характеристики потока, но этот вопрос требует учета модели конкретной системы;

7) применять при моделировании практически неограниченное число ячеек. Однако при использовании алгоритма в реальной системе число ячеек ограничено объемом памяти контроллера. При этом должна обеспечиваться приемлемая точность. Это отдельная техническая задача;

8) для ускорения работы программная реализация алгоритма использует кольцевой регистр вместо регистра сдвига. В таком случае на каждом шаге рассчитываются точка записи и точка съема информации внутри регистра.

Примеры расчета движения ленты транспортера

Пример 1. Выполним аналитический расчет для случая равноускоренного движения транспортера (рис. 6). Пусть длина ленты l , разгон ленты от v_1 до v_m происходит с ускорением a_m до момента t_m и далее движение идет с постоянной скоростью $v_m = a_m t_m$. В момент $t_1 = 0$ (для большей наглядности, что не умаляет общности расчета) на транспортер попадает

груз (в виде непрерывного потока элементов) и движется с начальной скоростью v_1 , в момент t_2 груз падает с транспортера. Для простого случая $t_m = t_2$ движение только равноускоренное (т.е. участка l_2 нет).

Имеем

$$\tau = t_2 = t_m, \tag{9}$$

$$\tau = \tau_1, \tag{10}$$

$$l = l_1 = v_1\tau + \frac{a_m\tau^2}{2}; \tag{11}$$

соответственно:

$$v_1\tau + \frac{a_m\tau^2}{2} - l_1 = 0 \tag{12}$$

или

$$\tau = -\frac{v_1}{a_m} + \sqrt{\left(\frac{v_1}{a_m}\right)^2 + \frac{2l}{a_m}}. \tag{13}$$

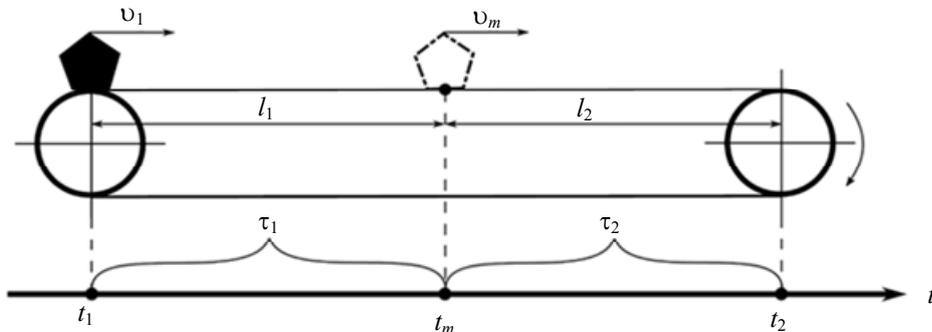


Рис. 6

Выполним расчет в общем случае равноускоренного и равномерного движения по участкам ленты. Пусть l_1 и l_2 — длина участков равноускоренного и равномерного движения соответственно. Время прохождения будет также τ_1 и τ_2 . Общее время $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Имеем для промежуточных величин:

$$\tau_1 = t_m, \quad \tau_2 = t_2 - t_m, \tag{14}$$

$$l_1 = v_1\tau_1 + \frac{a_m\tau_1^2}{2} = v_1t_m + \frac{a_mt_m^2}{2}, \tag{15}$$

$$l_2 = v_m\tau_2, \quad v_m = v_1 + a_mt_m. \tag{16}$$

Соответственно для искомым величин: $l = l_1 + l_2$, $\tau = \tau_1 + \tau_2$:

$$l = v_1t_m + \frac{a_mt_m^2}{2} + (v_1 + a_mt_m)(\tau - t_m), \tag{17}$$

$$\tau = \left(l + \frac{a_mt_m^2}{2} \right) / (v_1 + a_mt_m). \tag{18}$$

Решение (13) получается из уравнения (18) при $t_2 = t_m$ (результат решения является предельным значением для t_m).

Для иллюстрации работы транспортера можно построить две зависимости: τ от t_m для первого элемента (18) и τ от t_2 при постоянном t_m и изменении t_1 от 0 до t_m . Вторая

зависимость позволяет оценить точность работы регистра. Для элемента, упавшего в момент t_1 , имеем, не меняя обозначений: $v_1(t_1) = v_1 + a_m t_1$, $t_m(t_1) = t_m - t_1$,

$$\begin{cases} \tau(t_1) = \left(l + \frac{a_m (t_m - t_1)^2}{2} \right) / (v_1 + a_m t_m) & \text{для } t_1 \leq t_m, \\ \tau(t_1) = l / (v_1 + a_m t_m) & \text{для } t_1 > t_m. \end{cases} \quad (19)$$

Используя $\tau = t_2 - t_1$, строим вторую зависимость $t_2(t_1) = t_1 + \tau(t_1)$.

Можно усложнить пример.

Пример 2. Пусть одновременно с ускорением транспортера увеличивается его длина со скоростью v_n до момента t_n . Пусть $t_n \leq t_m$, тогда запаздывание τ будет

$$\begin{cases} \tau(t_1) = \left(l + v_n t_n + \frac{a_m (t_m - t_1)^2}{2} \right) / (v_1 + a_m t_m) & \text{для } t_1 \leq t_m, \\ \tau(t_1) = (l + v_n t_n) / (v_1 + a_m t_m) & \text{для } t_1 > t_m. \end{cases}$$

Используя $\tau = t_2 - t_1$, строим вторую зависимость $t_2(t_1) = t_1 + \tau(t_1)$, где t_2 — время падения груза с транспортера.

Если на входе модели гармонический сигнал $X(t_1) = A \sin(\omega t_1)$ (который затем попадает на интегратор), тогда:

$$Y(t_1) = \frac{A}{\omega} (1 - \cos(\omega t_1)) \text{ — сигнал на входе транспортера;}$$

$$Y_{\text{ВЫХ}}(t_1) = \frac{A}{\omega} (1 - \cos(\omega(t_1 - \tau(t_2)))) \text{ — сигнал на выходе транспортера.}$$

Применение стандартных БПЗ не вызывает в данном случае затруднений.

Однако в случае произвольной начальной функции, которая описывает поток, и произвольного изменения функций $l(t)$ и $v(t)$ применение алгоритма, встроенного в общую модель САУ, практически безальтернативно.

Приведенные выше аналитические расчеты работы транспортера по примерам 1 и 2 проверялись на модели, структурная схема которой приведена на рис. 7. Параметры $l = 10$; $v = 1$; $a_m = 1$; $t_m = 2$; $v_n = 5$; $t_n = 1$; $A = 2,5$; $\omega = \pi$; период колебаний на входе $T = 2$.

Результаты аналитических расчетов временных параметров движения груза на транспортере для примеров 1 и 2 показаны на рис. 8.

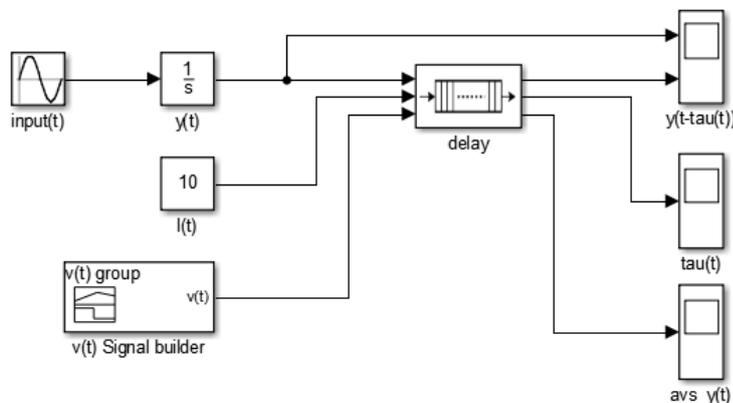


Рис. 7

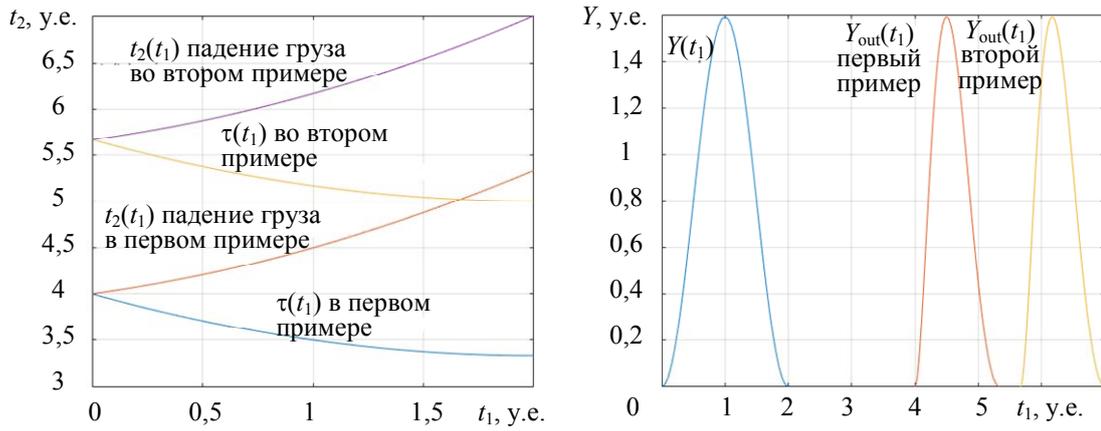


Рис. 8

Результаты моделирования работы транспортера с использованием алгоритма для первого примера показаны на рис. 9 (где 1 — скорость транспортера; 2 — гармонический сигнал на входе Y (показана часть сигнала); 3 — падение груза на входе; 4 — падение груза на выходе; 5 — гармонический сигнал $Y_{вых}(t_1)$; 6 — запаздывание $\tau(t_1)$; 7 — область, соответствующая изменению запаздывания гармонического сигнала и времени падения груза на выходе (отражает динамику изменения этих сигналов)), они совпадают с результатами аналитических расчетов. Подобные графики при необходимости могут быть построены и для второго примера.

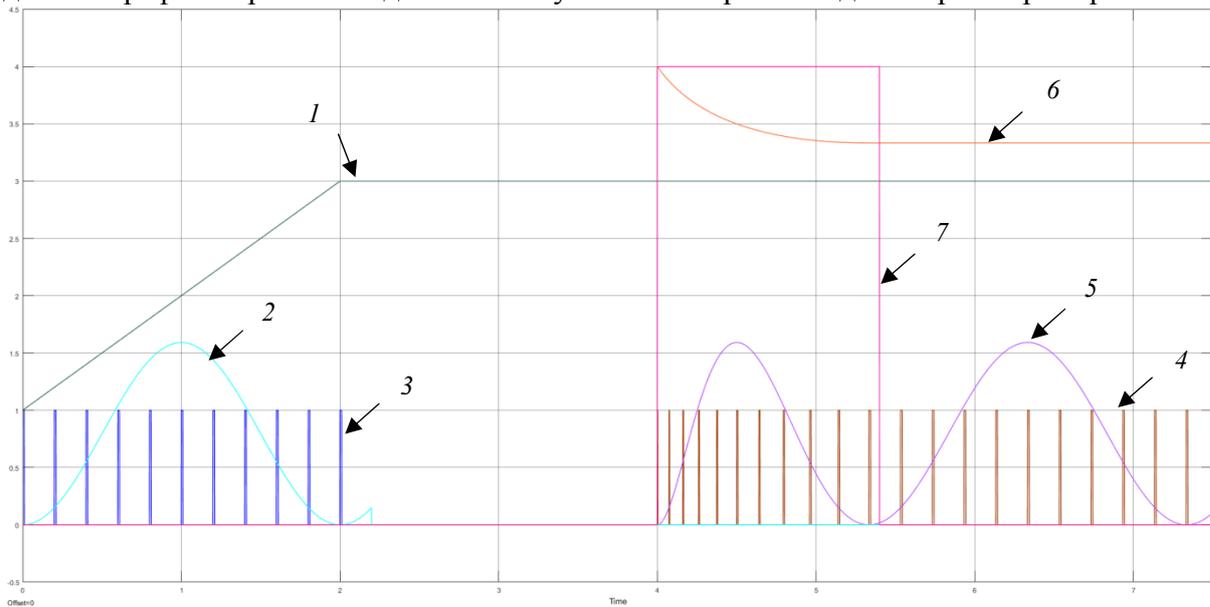


Рис. 9

Заключение. В работе проанализированы подходы к моделированию систем автоматического управления с переменным запаздыванием в среде MatLab/Simulink. Предлагается алгоритм моделирования такого запаздывания на основе регистра сдвига, который, в отличие от известных, позволяет создавать модели систем с запаздыванием при любых начальной функции и скорости сигнала, подаваемого на тракт его передачи с переменной длиной. Модель, реализованная алгоритмом, может использоваться для моделирования многомерных систем с несколькими переменными запаздываниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 367 с.
2. Колмановский В. Б., Носов В. Р. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием. М.: Наука, 1981. 448 с.
3. Андреев А. С., Седова Н. О. Метод функций Ляпунова–Разумихина в задаче об устойчивости систем с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2019. Т. 80, № 7. С. 3—60.
4. Куок Дат Во, Бобцов А. А., Николаев Н. А., Пыркин А. А. Стабилизация линейной нестационарной системы в условиях запаздывания и аддитивного синусоидального возмущения выхода // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 97—103.
5. Wang X., van Kampen E., Chu Q. P. Flexible Aircraft Gust Load Alleviation with Incremental Nonlinear Dynamic Inversion // Proceedings of the 2018 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. 2018. P. 1—18. DOI: 10.2514/1.g003980.
6. Bresch-Pietri D., Petit N. Implicit Integral Equations for Modeling Systems with a Transport Delay. Results on Time-Delay Systems // Analysis and Control. Advances in Delays and Dynamics. Switzerland: Springer, 2016. Vol. 5. P. 3—21.
7. Sbarciog M., De Keyser R., Cristea S., De Prada C. Nonlinear predictive control of processes with variable time delay // A temperature control case study. 17th IEEE Intern. Conf. on Control Applications. Part of 2008 IEEE Multi-Conference on Systems and Control. San Antonio, Texas, USA, 3—5 September 2008.
8. Ткачев Р. Ю. Транспортное запаздывание технологических процессов как объект исследований // Электроника та системи управління. 2012. № 2(32).
9. Беляев М. А., Филимонов В. И. Особенности управления энергетическими установками, работающими по специальному циклу // Вычислительные, измерительные и управляемые системы. Тр. СПбГТУ. СПб, 1996. С. 19—23.
10. Basudev M., Saptarshi D., Indranil P., Sayan S., Shantanu D., Amitava G. Estimation, Analysis and Smoothing of Self-Similar Network Induced Delays in Feedback Control of Nuclear Reactors // Proc. IEEE Conf. on Process Automation, Control and Computing. July 2011.
11. Liu Kun, Fridman E., Xia Yuanqing. Networked Control under Communication Constraints a Time-Delay Approach. Advances in Delays and Dynamics. Singapore: Springer Nature, 2020. Vol. 11. 258 p.
12. Smithand J., Lee N. Time Varying Delay Effects // RealSimpleProject Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA). 2008 [Электронный ресурс]: <<https://ccrma.stanford.edu/realsimple/DelayVar>>.
13. Туманов М. П. Результаты моделирования переменного запаздывания в распределенной системе автоматического управления с использованием модифицированных частотных методов // Программное и информационное обеспечение систем различного назначения на базе персональных ЭВМ. М.: МГАПИ, 2003. № 6. С. 251—252.
14. Кожубаев Ю. Н., Прокофьев О. В., Семенов И. М. Имитационная модель ленточного конвейера // Науч.-техн. ведомости СПбГУ. 2011. № 3(130). С. 116—122.
15. Леондес К. Т. Современная теория систем управления. М.: Наука, 1970. 512 с.
16. Mukhsen A. F., Belyaev M. A., Filimonov V. I. Time varying delay compensation in nonstationary linear automatic control systems // Электричество. 1995. № 5. С. 32—35.
17. Fridman E. Introduction to Time-Delay Systems. Analysis and Control. Birkhauser, 2014.
18. Филимонов В. И., Беляев М. А. Оператор сдвига в системах с последействием // Вычислительные, измерительные и управляющие системы. Тр. СПбГТУ. 1997. № 468. С. 41—45.
19. Фуртат И. Б. Адаптивное управление объектом с запаздыванием по управлению без использования прогнозирующих устройств // Управление большими системами. 2012. № 40. С. 144—163.
20. Soetaert K., Cash J., Mazzia F. Solving Differential Equations in R. Springer, 2012.
21. Филимонов В. И., Беляев М. А., Прокофьев О. В. Моделирование переменного комбинированного запаздывания // Вычислительные, измерительные и управляющие системы. Сб. науч. тр. 2007. С. 32—38.

- Сведения об авторах**
- Михаил Алексеевич Беляев** — канд. техн. наук, доцент; Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, кафедра корабельных систем управления; E-mail: bel.mih@bk.ru
- Олег Валерьевич Прокофьев** — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Институт компьютерных наук и технологий/Высшая школа программной инженерии, Высшая школа программной инженерии; старший преподаватель; E-mail: prokofiev_ov@spbstu.ru
- Александр Владимирович Прилуцкий** — ООО „НГ-Энерго“, департамент сервиса; главный специалист; E-mail: bobkins@mail.ru
- Сергей Валерьевич Таленфельд** — канд. техн. наук; ОАО „Авангард“, отдел отраслевой стандартизации; E-mail: talenfeld@corp.avangardf.org
- Валерий Антонович Шубарев** — д-р техн. наук, профессор; ОАО „Авангард“, руководство; гл. научный руководитель; E-mail: Shubarev@corp.avangardf.org

Поступила в редакцию 28.07.2023; одобрена после рецензирования 09.08.2023; принята к публикации 27.10.2023.

REFERENCES

1. Ray W.H. *Advanced Process Control*, NY, 1981.
2. Kolmanovskiy V.B., Nosov V.R. *Ustoychivost' i periodicheskiye rezhimy reguliruyemykh sistem s posledeystviyem* (Stability and Periodic Modes of Controlled Systems with Aftereffects), Moscow, 1981, 448 p. (in Russ.)
3. Andreev A.S., Sedova N.O. *Automation and Remote Control*, 2019, no. 7(80), pp. 1185–1229.
4. Quoc Dat Vo, Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Pyrkina A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 2(64), pp. 97–103. (in Russ.)
5. Wang X., van Kampen E., Chu Q.P. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2019, pp. 1–18, DOI: 10.2514/1.g003980.
6. Bresch-Pietri D., Petit N. *Analysis and Control. Advances in Delays and Dynamics*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, vol. 5, pp. 3–21.
7. Sbarciog M., De Keyser R., Cristea S., De Prada C. *A temperature control case study. 17th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control*, San Antonio, Texas, USA, September 3–5, 2000.
8. Tkachev R.Yu. *Electronics and control systems*, 2012, no. 2(32). (in Russ.)
9. Belyaev M.A., Filimonov V.I. *Computing, measuring and control systems. Collection of scientific papers. Proceedings of St. Petersburg State Technical University*, 1996, pp. 19–23. (in Russ.)
10. Basudev M., Saptarshi D., Indranil P., Sayan S., Shantanu D., Amitava G. *Proc. IEEE Conf. on Process Automation, Control and Computing*, July 2011.
11. Liu Kun, Fridman E, Xia Yuanqing. *Advances in Delays and Dynamics*, Singapore, Springer Nature, 2020, vol. 11.
12. Smithand J., Lee N. *Time Varying Delay Effects*, <https://ccrma.stanford.edu/realsimple/DelayVar>.
13. Tumanov M.P. *Programmnoye i informatsionnoye obespecheniye sistem razlichnogo naznacheniya na baze personal'nykh EVM* (Software and Information Support for Systems for Various Purposes Based on Personal Computers), Moscow, 2003, no. 6, pp. 251–252. (in Russ.)
14. Kozhubaev Yu.N., Prokofiev O.V., Semenov I.M. *Scientific and technical bulletins of St. Petersburg State University*, 2011, no. 3(130), pp. 116–122. (in Russ.)
15. Leonides K.T. *Sovremennaya teoriya sistem upravleniya* (Modern Theory of Control Systems), Moscow, 1970, 512 p. (in Russ.)
16. Mukhsen A.F., Belyaev M.A., Filimonov V.I. *Electricity*, 1995, no. 5, pp. 32–35. (in Russ.)
17. Fridman E. *Introduction to Time-Delay Systems. Analysis and Control*, Birkhauser, 2014.
18. Filimonov V.I., Belyaev M.A. *Computing, measuring and control systems. Collection of scientific papers. Proceedings of St. Petersburg State Technical University*, 1997, no. 468, pp. 41–45. (in Russ.)
19. Furtat I.B. *Large-Scale Systems Control*, 2012, no. 40, pp. 144–163 (in Russ.)
20. Soetaert K., Cash J., Mazzia F. *Solving Differential Equations in R*, Springer, 2012.
21. Filimonov V.I., Belyaev M.A., Prokofiev O.V. *Computing, Measuring and Control Systems. Collection of Scientific Papers*, 2007, pp. 32–38. (in Russ.)

Data on authors

- Mikhail A. Belyaev** — PhD, Associate Professor; Military Educational and Scientific Center of the Navy Naval Academy Named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, Department of Ship Control Systems; E-mail: bel.mih@bk.ru
- Oleg V. Prokofev** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Computer Science and Technology / Higher School of Software Engineering; Senior Lecturer; E-mail: prokofiev_ov@spbstu.ru

- Alexander V. Prilutsky** — NG-Energo LLC, Service Department; Chief Specialist; E-mail: bobkins@mail.ru
Sergey V. Talenfeld — PhD; Avangard JSC, Department of Industry Standardization;
E-mail: talenfeld@corp.avangard.org
Valery A. Shubarev — Dr. Sci., Professor; Avangard JSC, Management; Chief Scientific Adviser;
E-mail: Shubarev@corp.avangard.org

Received 23.28.07.2023; approved after reviewing 09.08.2023; accepted for publication 27.10.2023.